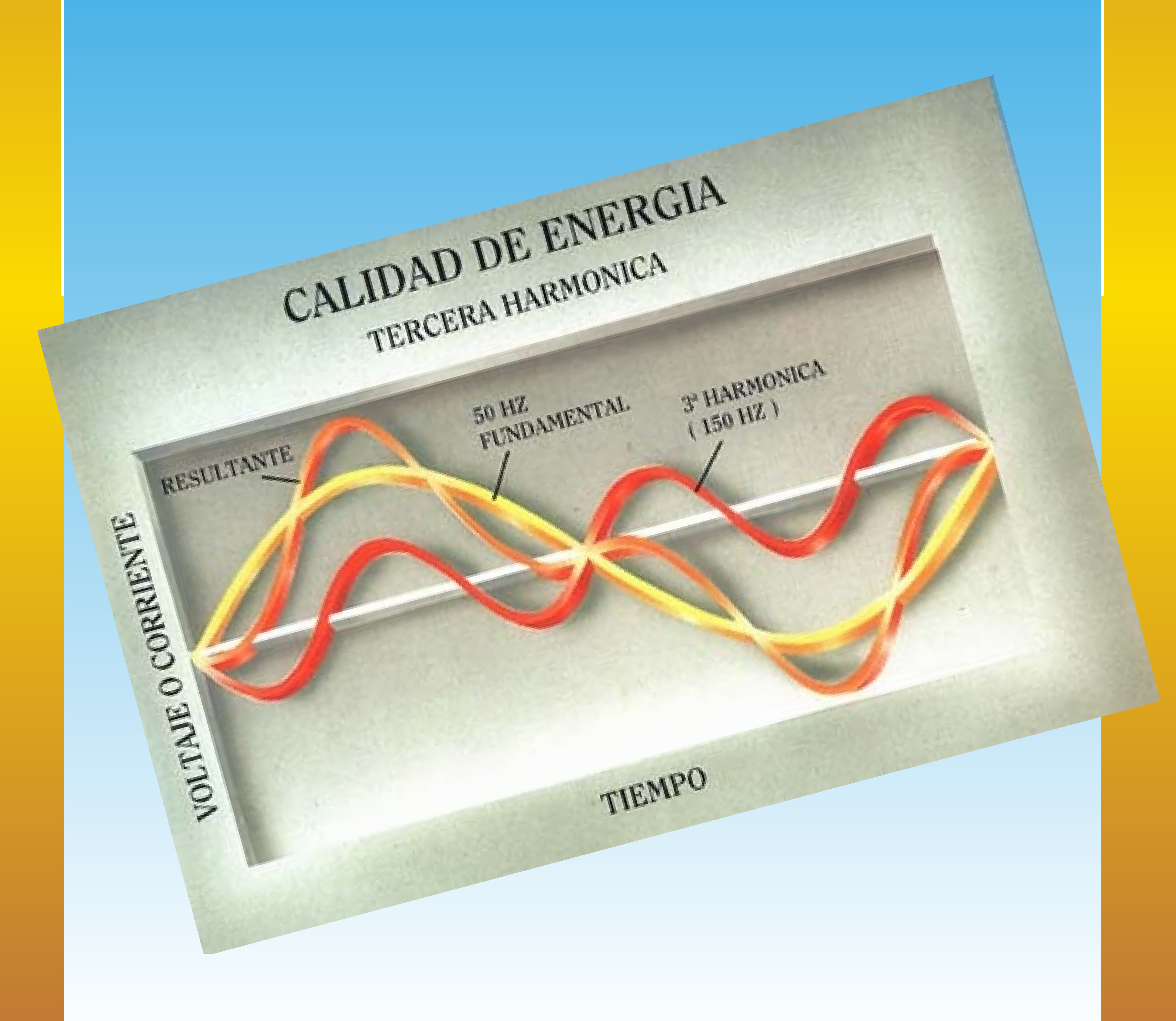
CALIDAD DE ENERGIA



INDICE

PARTE 1. DISTORSIÓN ARMÓNICA **Pag.**

PARTE 2. REGULACION DE VOLTAJE **Pag.**

PARTE 3. FLUCTUACION DE VOLTAJE DE BAJA FRECUENCIA

PARTE 1. DISTORSIÓN ARMÓNICA

1. FUNDAMENTOS

1.1. Consumos lineales.

Para estudiar las características de los sistemas eléctricos es usual considerarlos como resultado de la interconexión de diferentes bloques básicos:

a) La fuente de alimentación, usualmente un voltaje sinusoidal.
b) El consumo, usualmente constituido por resistencias, inductancias y condensadores de valores fijos.

Así, cuando el consumo es un calefactor eléctrico de 1000 W y el voltaje es 220 V efectivos, el voltaje y la corriente tendrán la forma de la Figura 1. Si el consumo es un motor de 1/6 HP, rendimiento 80%, factor de potencia 0,85, el voltaje y la corriente tendrán la forma de la Figura 2.

En resumen, si el voltaje es sinusoidal la corriente también lo es y, en general, existe un desfase entre ellos.

1.2. Consumos no lineales.

La electrónica de potencia puso a disposición de los hogares y las empresas productivas diversos equipos capaces de controlar el producto final: iluminación variable, velocidad ajustable, etc. Así, aproximadamente un 50% de la energía eléctrica pasa por un dispositivo de electrónica de potencia antes que ésta sea finalmente aprovechada. La electrónica de potencia hace uso de diodos, transistores y tiristores, y prácticamente todos ellos trabajan en el modo de interrupción («switching»). Esto significa que trabajan esencialmente en 2 estados:

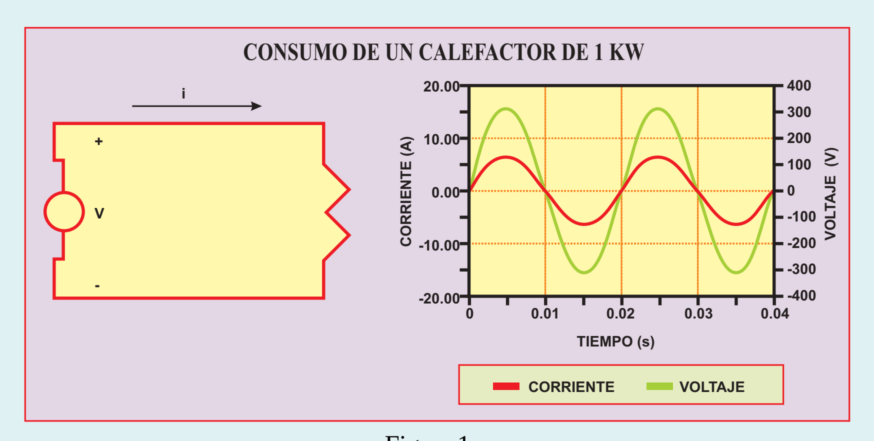


Figura 1
Consumo de un calefactor de 1 Kw

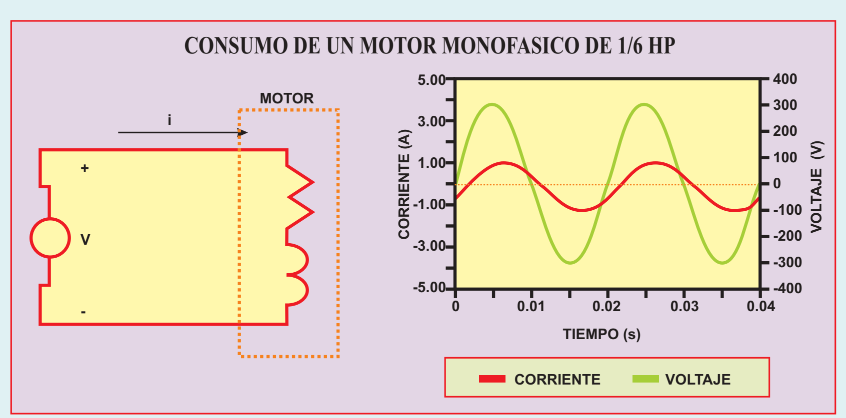
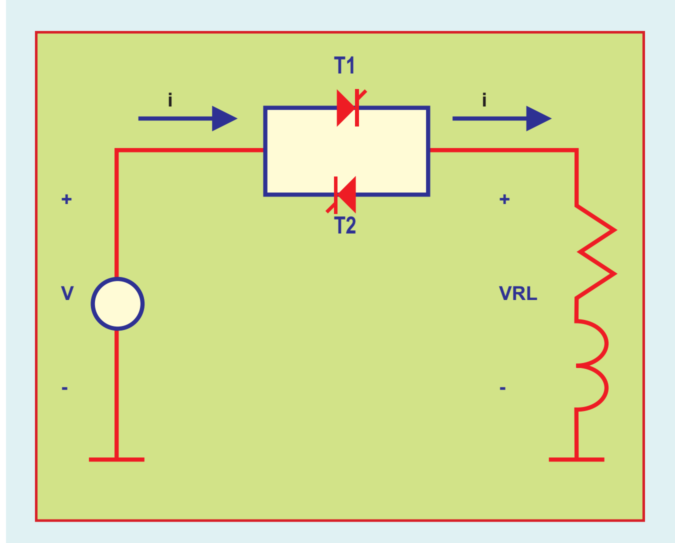


Figura 2
Consumo de un motor monofásico de 1/6 HP



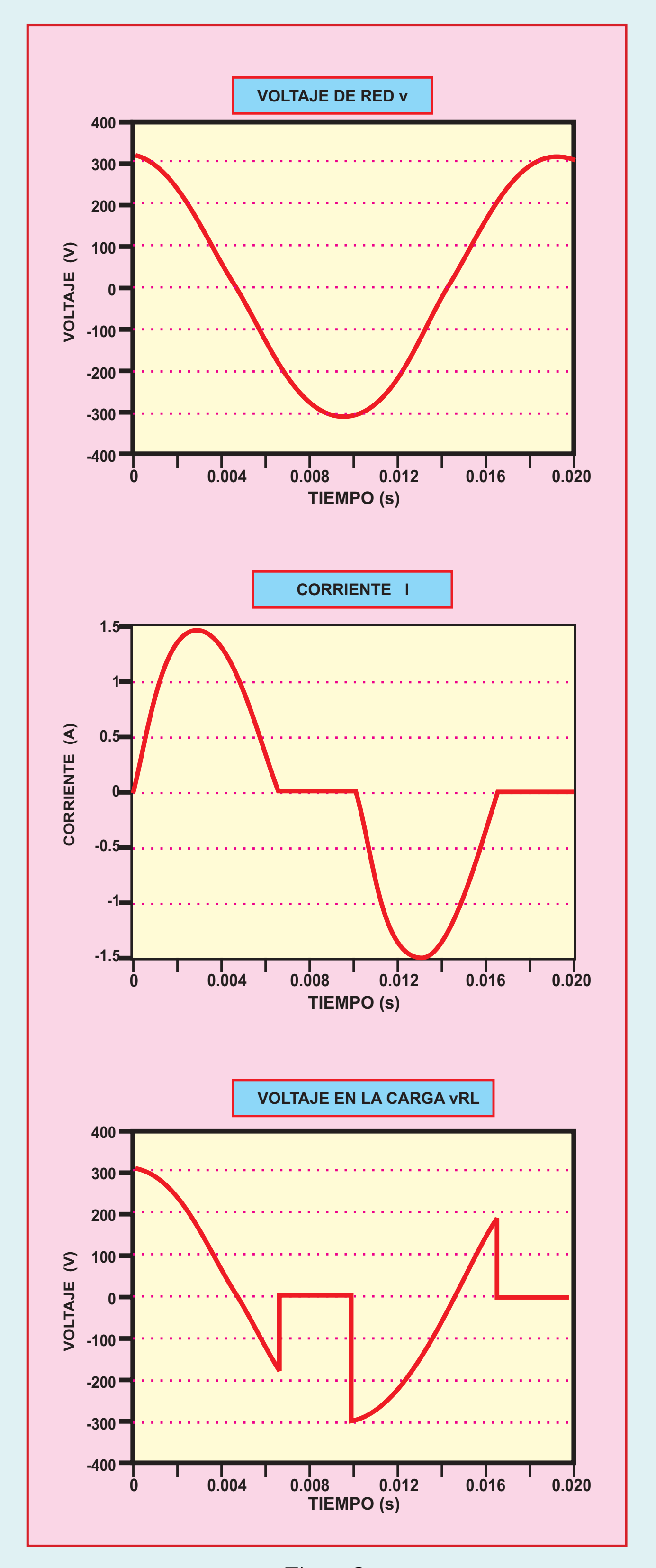


Figura 3
Dispositivo de control de la corriente y el voltaje de un circuito lineal.

a)Estado de conducción.

Corresponde a un interruptor cerrado. La corriente por el dispositivo puede alcanzar valores elevados, pero el voltaje es nulo y, por tanto, la disipación de potencia en él es muy pequeña.

b)Estado de bloqueo.

Corresponde a un interruptor abierto. La corriente por el dispositivo es muy pequeña y el voltaje es elevado; asi, la disipación de potencia en el dispositivo es también pequeña en este estado.

Todos los semiconductores de potencia pasan rápidamente de un estado a otro, mediante circuitos que consumen usualmente menos de 5 W se realiza el control de estos dispositivos.

La Figura 3 muestra un dispositivo para controlar la corriente en un consumo lineal constituido por una inductancia y una resistencia. El voltaje es interrumpido por los semiconductores y deja de ser sinusoidal; la corriente es nula en determinados intervalos de tiempo. El usuario puede controlar los instantes de conducción y por tanto variar el voltaje y la corriente.

Al resultar corrientes no sinusoidales se habla de distorsión armónica y de consumos no-lineales.

2.1. Planteamiento general.

La corriente o el voltaje no sinusoidal se puede expresar mediante diversas componentes, llamadas armónicas:

$$V(\tau)= V_{m1} \cos(\omega\tau+\phi_{v1}) + V_{m2} \cos(2\omega\tau+\phi_{v2}) + V_{m3} \cos(3\omega\tau+\phi_{v3}) + ...+ V_{mh} \cos(h\omega\tau+\phi_{vh})$$

$$i(\tau)= I_{m1} \cos(\omega\tau+\phi_{i1}) + I_{m2} \cos(2\omega\tau+\phi_{i2}) + I_{m3} \cos(3\omega\tau+\phi_{i3}) + ...+ I_{mh} \cos(h\omega\tau+\phi_{ih})$$

La Tabla 1 muestra el análisis armónico de la corriente, en amperes y en porcentaje, correspondiente a la comente de la Figura 3. Cada armónica tiene su fase y su amplitud; en general, las armónicas de orden par son nulas debido a que los dispositivos actúan en forma simétrica y periódica. Las armónicas de orden elevado son pequeñas, fundamentalmente debido a que las variaciones son suavizadas por la presencia de inductancias en el sistema. Por el contrario, la presencia de armónicas pares es síntoma de que el control de los semiconductores está desajustado y la presencia de armónicas elevadas puede ser indicio de variaciones bruscas de voltaje o corriente que pueden conducir a un deterioro del equipo bajo control o radio interferencia en equipos de radio y televisión.

La Figura 4 muestra gráficamente la factibilidad de construir una onda a partir de sus armónicas. En este caso, sólo con la fundamental y las armónicas 3 y 5 el resultado es ya bastante adecuado.

2.2. Análisis armónico de la corriente armónica de un controlador de luz incandescente.

Un sistema similar al mostrado en la Figura 3, se emplea para regular la iluminación emitida por una ampolleta de luz incandescente. Por cierto que, a plena luz, los semiconductores conducen todo el tiempo, y el voltaje y corriente resultan sinusoidales. Para disminuir la iluminación se hace conducir los semiconductores durante un tiempo menor, disminuyendo la potencia en la lámpara. En estas circunstancias, la corriente por la lámpara y por el sistema crece en armónicas. La Figura 5 muestra la variación de la armónica 3 al variar la potencia de la lámpara; se observa que entre un 15% y un 75% de luminosidad, la corriente de armónica 3 inyectada fluctúa entre 0.18 y 0.20 A máximos, es decir, aproximadamente un 30% de la comente nominal de la lámpara.

TABLA 1

Análisis armónico de la corriente de la Figura 3

h	I_{mh}(Am)	I_h (%)	ANGULO I_h(º)
1	1,1175	100,00	-56.1
3	0,4301	38,49	-165.0
5	0,0754	6,74	-131.5
7	0,0485	4,34	149.2
9	0,0432	3,87	-170.9
11	0,0091	0,82	-153.0
13	0,0176	1,50	146.7
15	0,0141	1,26	-170.5

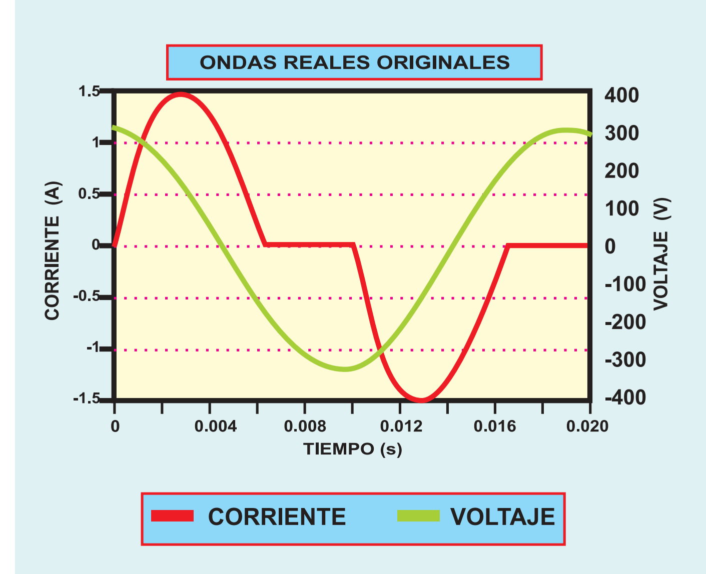


Figura 4a

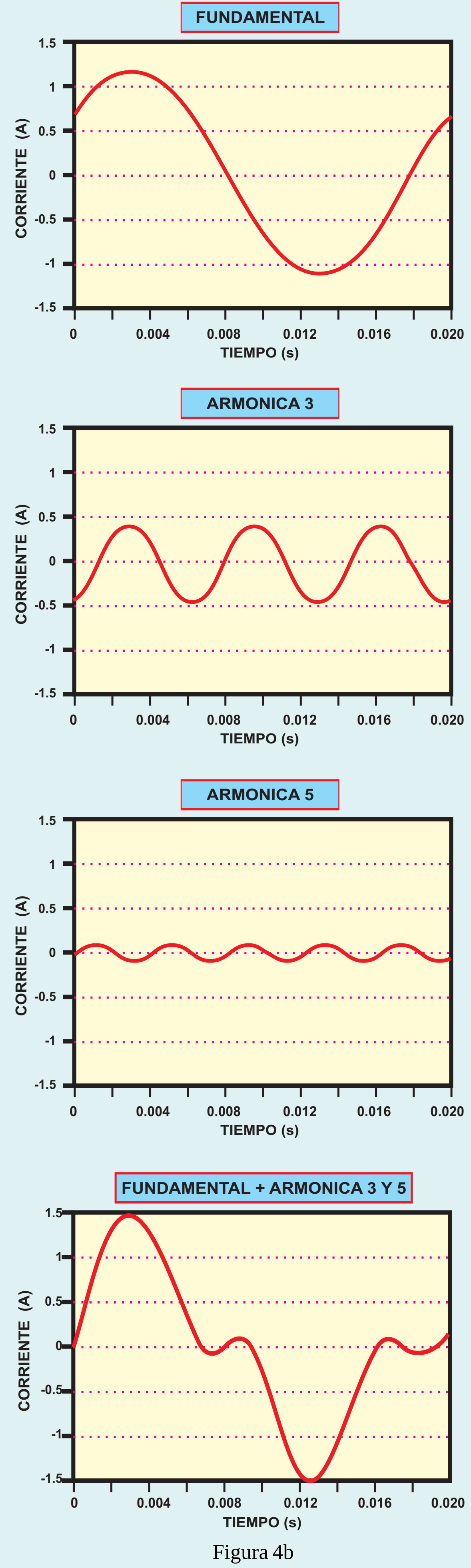


Figura 4b

Descomposición de la corriente original en sus armónicas

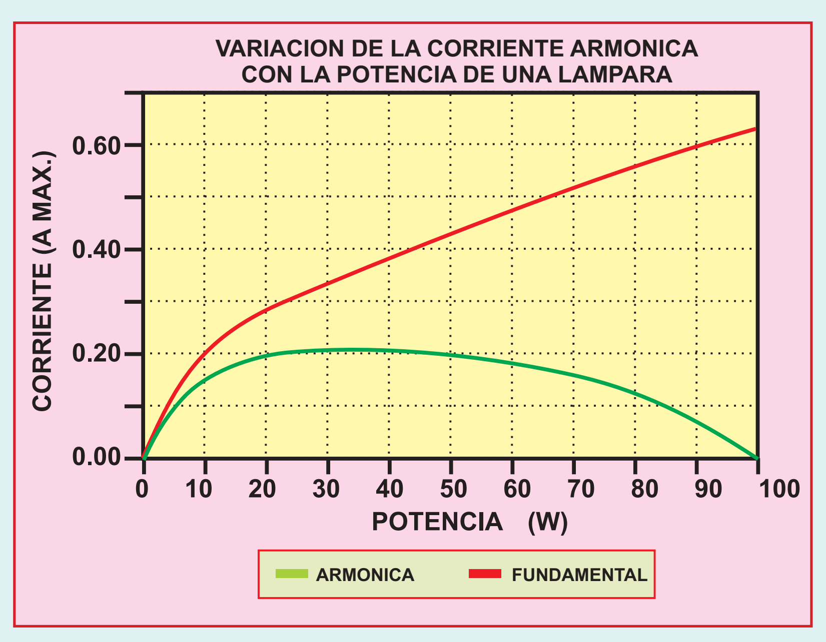


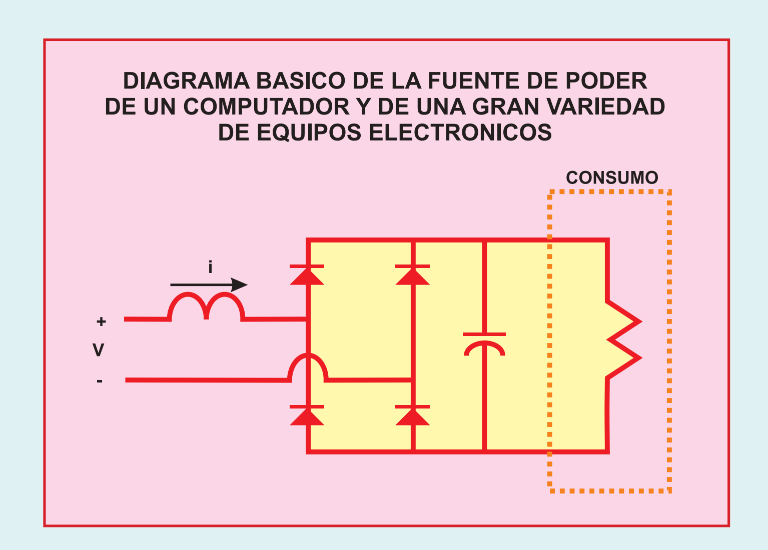
Figura 5

Variación de la corriente armónica con la potencia de una lámpara.

3. NORMA IEC.555-2 SOBRE ARMONICA EN ELECTRDOMESTICOS

3.1. Armónicas en rectificadores: computadores y televisores.

Si bien existen diversos equipos cuyo consumo es no-lineal, televisores y computadores son de empleo masivo y, por tanto, las armónicas que inyectan han sido motivo continuo de análisis y normalización. La razón por la cual su consumo es no-sinusoidal se relaciona con el empleo de un circuito de rectificación o fuente de poder de alimentación. La Figura 6 muestra un diagrama básico circuital y la forma de onda de la corriente que se observa en la red de 220 V. Básicamente, el circuito con diodos conduce sólo en los instantes en que el voltaje se acerca al valor máximo; en ese instante se recarga el condensador que mantiene constante (simulando una batería de voltaje continuo constante), el voltaje en bornes del rectificador. Cuando el voltaje sinusoidal es inferior al voltaje del condensador los diodos dejan de conducir. El resultado es que prácticamente todos los computadores y televisores tienen un consumo de corriente pulsante, como el mostrado en la Figura 6; los pulsos de corriente coinciden con el valor máximo del voltaje, lo que acentúa el problema de distorsión debido a la simultaneidad de este pulso de corriente en todos los televisores y computadores.



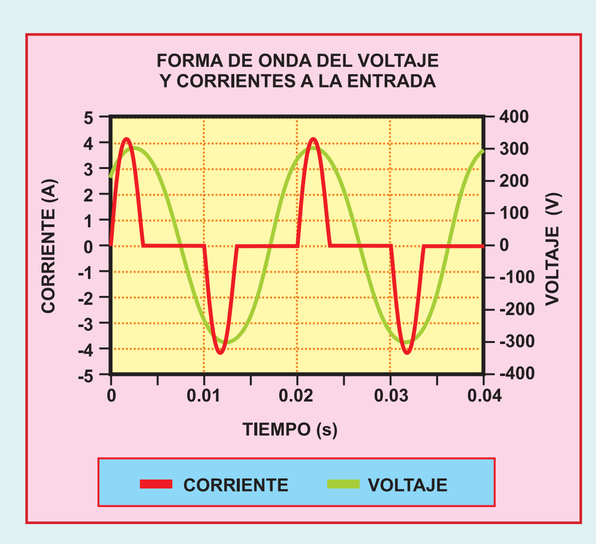


Figura 6

a) Diagrama básico de la fuente de poder de un computador y de una gran variedad de equipos electrónicos.

b) FOrma de onda del voltaje y corrientes a la entrada

3.2. Límites de la Norma IEC 555-2.

La Norma IEC 555 - 2 establece las exigencias sobre armónicas que deben cumplir todos aquellos equipos que consumen menos de 16 A por fase en la red de 220 V a 415 V. Entre ellos figuran los computadores personales y los televisores.

La Tabla 2 muestra los límites que todo equipo de más de 50 W debe cumplir. Bajo esa potencia no existirá límite alguno. La Norma establece los límites en base a valores eficaces (rms) de cada armónica. La relación entre valor eficaz y valor máximo es:

$$I_{rmsh}\,[A\ rms] = \frac{I_{mh}\,[A\ max]}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rmsh\ tot}\,[A\ rms] = \sqrt{I^2_{rms1} + I^2_{rms2} + I^2_{rms3} + \ldots + I^2_{rmsh}}$$

El valor efectivo total es la suma cuadrática del valor rms de cada armónica:

TABLA 2

Límite de Norma IEC 555-2

ARMÓNICA h	LIMITE mA/W	LIMITE A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 y más	3,85/n	0,15 • 15/n

Los límites expuestos en la Tabla 2 se aplican, a modo de ejemplo, al consumo de un computador personal que posee una fuente de poder de 200 W. La fuente tiene una eficiencia de un 75% de modo que absorbe de la red 267 W. La Tabla 3 señala los límites derivados del standard. En este caso, como en todo equipo menor que 670 W, el límite está impuesto por el valor en m A/W descrito en la Norma.

Así, usualmente, los computadores distorsionan la red con una corriente armónica que es levemente superior a la admitida por la Norma. Debe hacerse notar que, en 1982, la Norma IEC sólo establecía el límite absoluto en Amperes indicado en la Tabla 2, que en el caso de la armónica 11 es 0,33 A, es decir, bastante superior al límite aceptado hoy.

La solución al problema, entre otras, consiste en agregar una inductancia en serie con la fuente (del orden de 10 mH). Con ello, los valores se modifican y prácticamente cumplen con lo exigido. En todo caso la Norma permite inyectar un 75% de armónica 3, situación que será necesario considerar en los diseños de alambrados.

TABLA 3

Límites aplicados a un PC de 200W.

ARMÓNICA h	LIMITE [A rms]	ONDA FIG.6 [A rms]
1		1.201
3	0,908 .	0.977*
5	0,508	0,620*
7	0,266	0,264
9	0,133	0,068
11	0,094	0,114*
13	0,079	0,089*
15	0,069	0,029
17	0,061	0,042
19	0,054	0,044
21	0,049	0,019
23	0,045	0,020

* Valor excedido.

4.1. Descripción de un sistema trifásico.

Un sistema trifásico está constituido por tres voltajes de igual amplitud, pero desfasados en 120°:

$$V_{AN} = V_{m1} \cos(\omega\tau + \phi_{v1})$$

$$V_{BN} = V_{m1} \cos(\omega\tau + \phi_{v1} - 120^o)$$

$$V_{CN} = V_{m1} \cos(\omega\tau + \phi_{v1} + 120^o)$$

Si suponemos que, conectado a la fase A se tiene un consumo no-lineal:

$$i_A = I_{m1} \cos(\omega\tau + \phi_{i1}) + I_{m3} \cos(3\,\omega\tau + \phi_{i3}) + \ldots\ldots\ldots$$

Si en la fase B se tiene conectado un consumo idéntico, la corriente será idéntica pero desplazada en 120°, tal como se muestra en la Figura 7. Analíticamente, desplazar una corriente en 120° significa:

$$i_B = I_{m1} \cos(\omega\tau - 120^o)\phi_{i1}) + I_{m3} \cos(3\,\omega\tau - 120^o) + \phi_{i3} + \ldots\ldots$$

Conceptual y prácticamente esto ocurre debido a que, como se ha dicho, en un televisor, por ejemplo, los pulsos de corriente deben coincidir con los valores máximos de cada voltaje. Así, en cada fase, se tendrá los mismos pulsos pero corridos en 120°. Analíticamente, entonces, la armónica 3 se desplaza en 3 veces 120° (o sea 360°) mientras la fundamental sólo en 120°. Análogamente, la armónica 5 se desplaza en 5 veces 120° y así sucesivamente.

Las corrientes por el conductor de neutro son:

$$i_N = i_A + i_B + i_C$$

El resultado, gráficamente, se muestra en la Figura 7 en la que se observa que, prácticamente, la corriente de neutro es de armónica 3. Analíticamente:

$$i_B = I_{m1} \cos(\omega\tau + \phi_{i1}) + I_{m3} \cos(\omega\tau - 120^o + \phi_{i1}) + I_{m1} \cos(\omega\tau + 120^o + \phi_{i1}) + I_{m3} \cos(3\omega\tau + \phi_{i3}) + \\ + I_{m3} \cos 3(\omega\tau - 120^o) + \phi_{i3} + I_{m3} \cos 3(\omega\tau + 120^o) + \phi_{i3}$$

Al sumar las corrientes desplazadas en 120 grados el resultado es nulo; las que quedan desplazadas en 360° no se anulan: se suman. De este modo:

$$I_N = 31_{m3} \cos(3\omega\tau + \phi_{i3}) + 3I_{m9} \cos(9\omega\tau + \phi_{i9}) + \ldots..$$

Es decir, bajo la hipótesis de un sistema con idéntico consumo no-lineal en las tres fases, circula una corriente por el neutro igual a 3 veces la corriente de armónica 3 que circula por una fase. Esto significa que si un consumo está constituido sólo por computadores y televisores, la corriente por el neutro será superior a la corriente de fase y éste deberá dimensionarse tomando en consideración lo anterior.

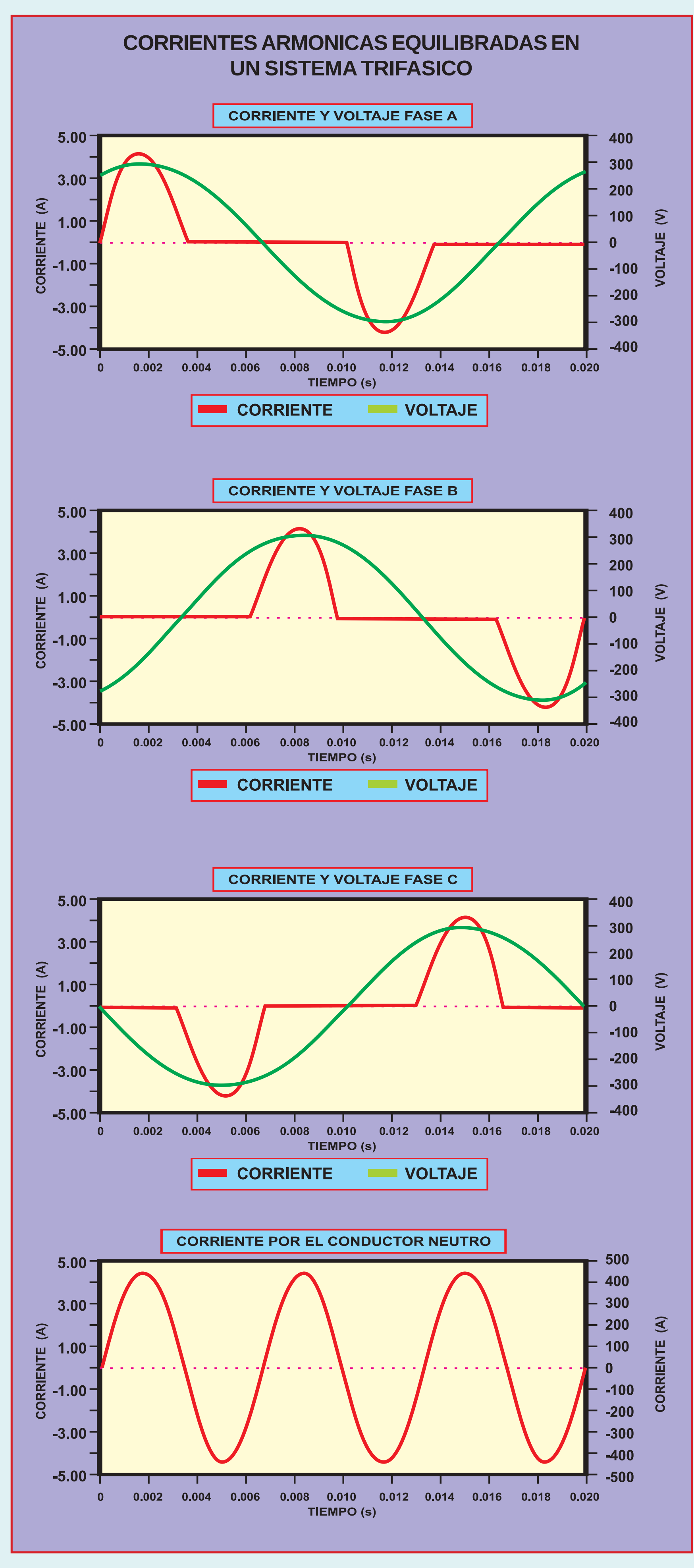


Figura 7

Corrientes Armónicas equilibradas en un sistema trifásico

4.2. Tableros exclusivos dedicados a computadores

Es común observar, en grandes edificios, que se deja un tablero de uso exclusivo para conectar computadores y equipos electrónicos. Si este tablero es trifásico, se tendrá en las tres fases un consumo similar al mostrado en la Figura 7 (detallado en la Tabla 3) y por el neutro circularán las armónicas impares múltiplos de 3 (3, 9,15, 21). La Tabla 4 muestra el resultado que se obtiene. Se ha agregado una columna con los valores al cuadrado para facilitar la realización de la suma total necesaria para calcular el valor efectivo rms total. El resultado es que la corriente de neutro resulta igual a 1,73 veces la corriente de fase, situación que, si no es prevista por el proyectista producirá problemas. Normalmente el conductor de neutro no tiene protección de sobrecarga.

TABLA 4

Corrientes de Fase y Corriente de Neutro
(Caso Figura 7)

h	Corriente fase A (i_A) [A rms]	[A rms ^{2}]	Corriente neutro (i_N) [A rms]	[A rms ^{2}]
1	1.201	1.442	0.000	0.000
3	0.977	0.955	2.931	8.591
5	0.620	0.384	0.000	0.000
7	0.264	0.070	0.000	0.000
9	0.068	0.005	0.204	0.042
11	0.114	0.013	0.000	0.000
13	0.089	0.008	0.000	0.000
15	0.029	0.001	0.087	0.008
17	0.042	0.002	0.000	0.000
19	0.044	0.002	0.000	0.000
21	0.019	0.000	0.057	0.003
23	0.020	0.000	0.000	0.000
TOTAL	1.698 [A rms] 100%	2.882 [A rms ^{2}] ----	2.940 [A rms] 173%	8.643 [A rms ^{2}] ----

4.3. Corrientes medidas en un edificio de oficinas

Los valores reales medidos en edificios de oficinas confirman lo aseverado hasta aquí. La Tabla 5 muestra el consumo por fase y el del neutro en un edificio[1], observándose incrementos de la corriente de neutro con respecto a las de fase.

TABLA 5

Corriente medidas en un edificio de oficinas

CORRIENTE TOTAL EN EDIFICIO		
FASE A	410	Arms
FASE B	445	Arms
FASE C	435	Arms
NEUTRO	548	Arms
CORRIENTE EN UN CIRCUITO PARTICULAR		
FASE A	7,8	Arms
FASE B	9,7	Arms
FASE C	13,5	Arms
NEUTRO	15,0	Arms

[1] Trober, Dick: «Trouble shooting harmonícs in a modern office building». En: Electricity Today, Vol. 3, N° 2, Feb,. 1991, pp.33-35

4.4. Corrientes de entrada de fuentes de poder no interrumpidas trifásicas

En sistemas computacionales de gran valor es usual emplear fuentes de poder no interrumpidas (UPS) para alimentar los consumos durante los cortes de energía y, también, para garantizar que la alimentación de los equipos tiene una regulación adecuada. Estas fuentes de poder son rectificadores idénticos a los ya explicados y, por tanto inyectan armónicas a la red.

Las fuentes de poder no interrumpidas pueden ser monofásicas, como las ya analizadas, o trifásicas, es decir, en base a un rectificador trifásico se cargan las baterías de respaldo para los momentos en que no hay energía. Este rectificador trifásico no tiene conexión de neutro; esto imposibilita la circulación de armónicas múltiplos de 3 por cada fase. La Figura 8 muestra la corriente típica observada en una fase de un rectificador trifásico. Al realizar el análisis armónico de esta corriente se observa que la armónica más importante es la número 5, es decir, de 250 Hz, lo que corresponde a un 18% de la corriente fundamental (Figura 9).

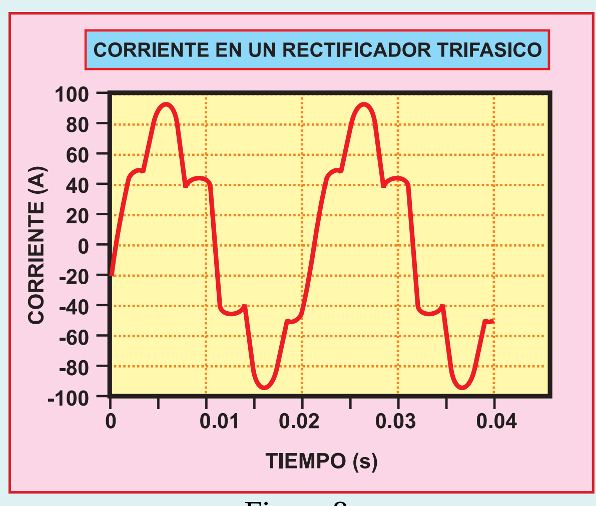


Figura 8
Corriente por una fase de un rectificador trifásico.

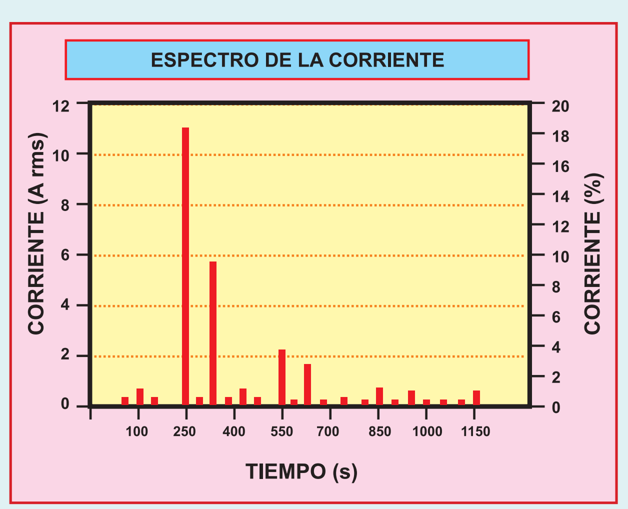


Figura 9
Análisis espectral de la corriente de fase de un rectificador trifásico.

5. NORMA IEEE-519 Y REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS (CHILE)

Las Normas definen para establecer sus límites los factores siguientes:

$$THV = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + \ldots + V_h^2}{V_1}} \cdot 100\%$$

$$THI = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_h^2}{I_1}} \cdot 100\%$$

THV: distorsión total de voltaje
THI : distorsión total de corriente.

La norma IEC define en forma levemente diferente estos factores:

$$DHV = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \ldots + V_h^2}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots + V_H^2}} \bullet 100\%$$

$$DHI = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_h^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_H^2}} \bullet 100\%$$

El Reglamento que se dictará en Chile se regirá por la definición IEEE. La diferencia, como se verá, no es determinante.

5.1. Límite de la distorsión de voltaje

La Norma IEEE-519 y el Reglamento que probablemente regirá en Chile establece los límites de distorsión de voltaje indicados en la Tabla 6.

TABLA 6		
Límites de Distorsión de Voltaje.		
VOLTAJE NOMINAL	Vh/V1 * 100 [%]?	THV [%]?
$V_{NOM} \leq 69$ KV	3,0	5,0
69 KV < $V_{NOM} \leq 161$ KV	1,5	2,5
$V_{NOM} > 161$ KV	1,0?	1,5

5.2. Límite de la distorsión de corriente

La Norma IEEE-519 y el Reglamento que probablemente regirá en Chile establece una Tabla límite para las corrientes armónicas inyectadas por un usuario. Para establecer este límite se debe conocer:

a) El valor de la corriente de cortocircuito *ISC* en el empalme del usuario, es decir, en el lugar donde se medirá la inyección de armónicas. Este valor debe ser entregado por la compañía distribuidora de electricidad ya que depende del valor de sus transformadores de distribución.

b) La demanda media 1L del usuario, calculada como el valor medio de las demandas máximas leídas durante los 12 meses precedentes a la medición.

Con estos valores de determinan los valores máximos permitidos de distorsión de corriente de cada usuario en particular (Tabla 7).

TABLA 7						
Límites de Distorsión de Corriente (Válidos para redes de 120 V a 69 KV)						
Distorsión Armónica en % de I_L (h impar)						
ISC/IL	h<11	11 ≤ h<17	17 ≤ h<27	23 ≤ h<35	35 ≤ h	THI
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

El límite de las armónicas pares es un 25% del valor indicado.
Para sistemas de más de 69 kV los límites son un 50% de los indicados

6. EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS

6.1. Resonancia de condensadores de compensación de factor de potencia.

La Figura 10 muestra el circuito equivalente de un sistema típico constituido por un transformador de alimentación, un banco convencional de condensadores y una fuente de armónicas que inyecta 38 A de armónica 5.

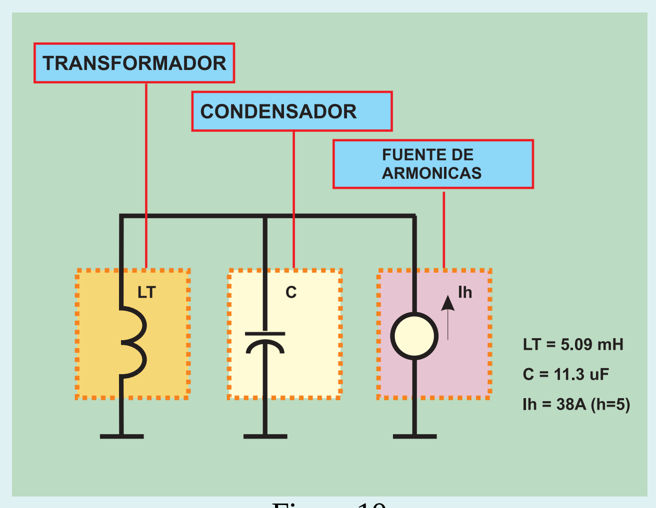


Figura 10
Circuito equivalente armónico de un sistema con condensadores de compensación de factor de potencia.

En ausencia del condensador, la distorsión en el sistema se puede calcular mediante:

$$V_h = \omega L_i I_h = 5 \bullet 2\pi 50 \bullet 5.09\ 10^{-3} \bullet 38 = 303.8V$$

El voltaje nominal del sistema analizado es 20kV entre fase, de manera que:

$$Vh\ [\%] = \frac{303.8}{20000 / \sqrt{3}} \bullet 100 = 2.63\%$$

Es decir, se trata de una distorsión de un valor real aceptado por mormas.

Al conectar el condensador de compemsación de factor de potencia(2), eol valor armonico será:

$$V_h = [V] = 38 \bullet Z_{eq}\ (h)$$

en que:

$$\frac{1}{Z_{EQ}} = Y_{EQ} = \frac{1}{5 \bullet 2\pi\ 50 \bullet 5{,}09 \bullet 10^{-3}} + 5 \bullet 2\pi\ 50 \bullet 11{,}3 \bullet 10^{-6} = -0.1073$$

El voltaje o distorsión es:

$$V_h = \frac{38}{0.1073} = 354V = 3.07\%$$

La distorsión del sistema crece, pero lo que es más grave, el sistema presentará una resonancia alrededor de la armónica 13. En efecto:

$$h_{res} = \frac{1}{2\pi 50\ \sqrt{5.09 \bullet 10^{-3} \bullet 11.3 - 10^{-6}}} = 13.3$$

Esto significa que los condensadores aumentan la distorsión en un sistema, y contribuyen a producir el fenómeno de resonancia, es decir, un aumento de la distorsión enormemente elevado, que termina por hacer explotar condensadores o transformadores, si es que las protecciones no operan debido, precisamente, a la presencia de armónicas en el sistema.

[2] La potencia reactiva, por fase, compensada por el condensador es:

$$Q_d = \left[\frac{2000}{\sqrt{3}}\right]^2 \bullet 2\pi 50 \bullet 11.3 \bullet 10^{-6} = 473.3 \bullet 10^3 [VAR]$$

6.2. Compensación con condensadores antiresonantes

La Figura 11 muestra la solución del problema de compensar reactivos en sistemas distorsionados. Básicamente consiste en agregar una inductancia en serie con el condensador de compensación de reactivos:

$$\omega L f = \frac{7}{100} \frac{1}{\omega C f}$$

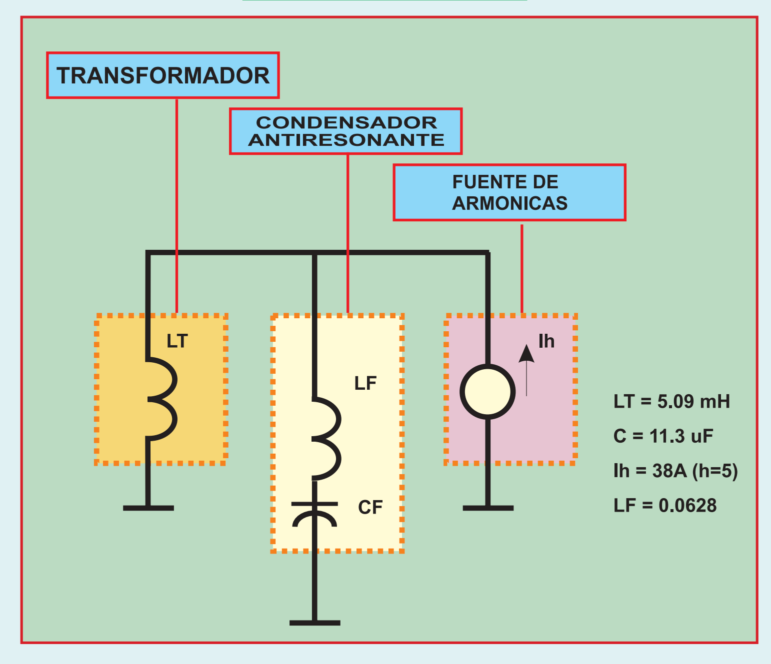


Figura 11
Compensación de potencia reactiva antiresonante.

La Tabla 8 muestra los valores de las impedancias a cada armónica. La notación empleada es:

ZT : impedancia del transformador

Zf : impedancia del filtro

ZEQ : impedancia equivalente (paralelo de transformador y filtro).

TABLA 8

Valores de las Impedancias
Condensadores Antiresonantes

h	Z_T [Ω]	Z_T [Ω]	Z_{EQ} [Ω]
5	7,99	42,30	6,72
7	11,19	97,86	10,04
11	17,59	191,41	16,11

Empleando los valores de la Tabla 8 es posible calcular la distorsión de tensión:

$$V_h = 6.72 \bullet 38.2 = 256.7 \text{ V} = 2.22\%$$

Es decir, la distorsión del sistema disminuye levemente. Sin embargo, lo más relevante es que han desaparecido los riesgos de resonancia (descritos en el párrafo anterior), pues el sistema Lf, Cf se comporta como una inductancia por sobre la armónica 4. La Figura 12 muestra los precios de los condensadores antiresonantes comparados con el de los condensadores convencionales.

6.3. Incremento de pérdidas: El factor K.

Las corrientes armónicas producen un incremento de las pérdidas. Particularmente en el interior del transformador, se producen dos pérdidas relevantes:

a) Las pérdidas proporcionales a la resistencia de los enrollados y a la suma al cuadrado de las corrientes fundamentales y armónicas.

b) Las pérdidas por corrientes parásitas (eddy currents) que son proporcionales al cuadrado de la corriente armónica y al cuadrado del orden de la armónica.

En cables y conductores de cobre sólo la primera de ellas está presente y, por tanto, es relativamente simple calcularlas con los procedimientos hasta ahora indicados.

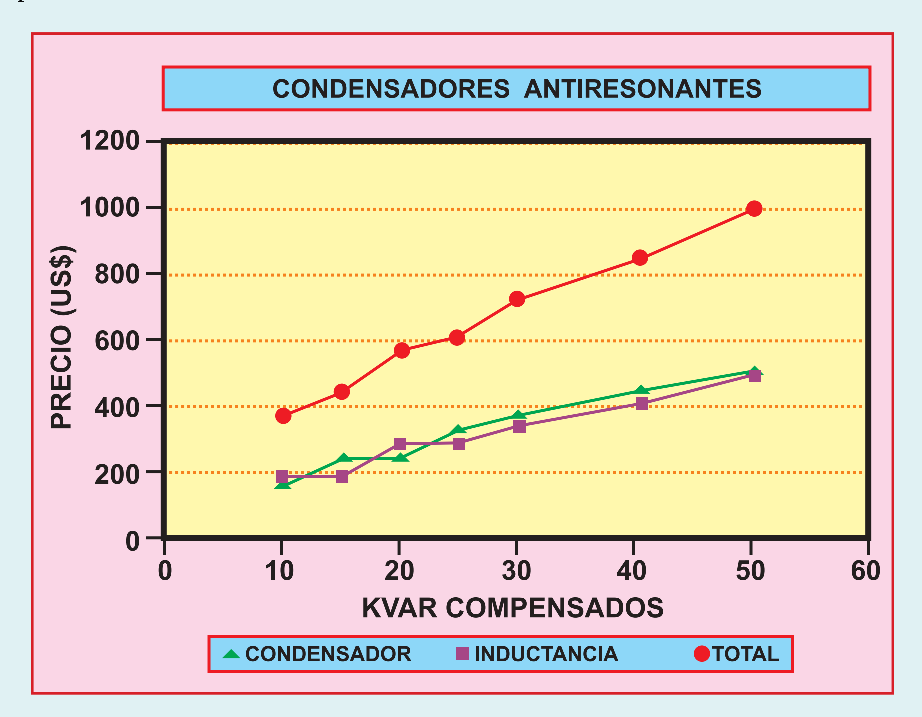


Figura 12

Precios de condensadores antiresonantes (baja tensión).

En el caso de transformadores sometidos a corrientes armónicas, existen ambas pérdidas y el cálculo es más complicado. El procedimiento que se describe a continuación se basa en la Recomendación IEEE C57.100-1986.

Según esta recomendación las pérdidas por estos dos conceptos, se pueden expresar mediante:

$$PERD\,[W] = K_{RES} \bullet \sum_{h=1} I_h^2 + K_{EDDY} \sum_{h=1} h^2 I_h^2$$

De no existir un dato más fidedigno, es posible suponer que, en ausencia de armónicas, las pérdidas por corrientes parásitas son un 15% de las pérdidas por resistencia en los enrollados. Se define el factor K de una corriente mediante:

$$K = \sum_{h=1} h^2\, I_h^2 \; (°/1)$$

El valor de Ih en °/l es:

$$I_h[°/1] = \frac{I_h\,[A]}{I_{rms}[A]}$$

Empleando esta definición, la máxima corriente que soporta un transformador es:

$$I_{MX}\ (^{o}/1) = \sqrt{\frac{1.15}{1+0.15K}}$$

La Figura 13 muestra el valor de esta corriente en función de K. Se observa que si el valor de K es 15 entonces la máxima corriente que soporta un transformador es 0,6 veces la nominal.

A modo de ejemplo, la Tabla 9 muestra valores habituales de las corrientes armónicas en un rectificador trifásico. Simultáneamente, en la misma Tabla 9 se calcula el factor K.

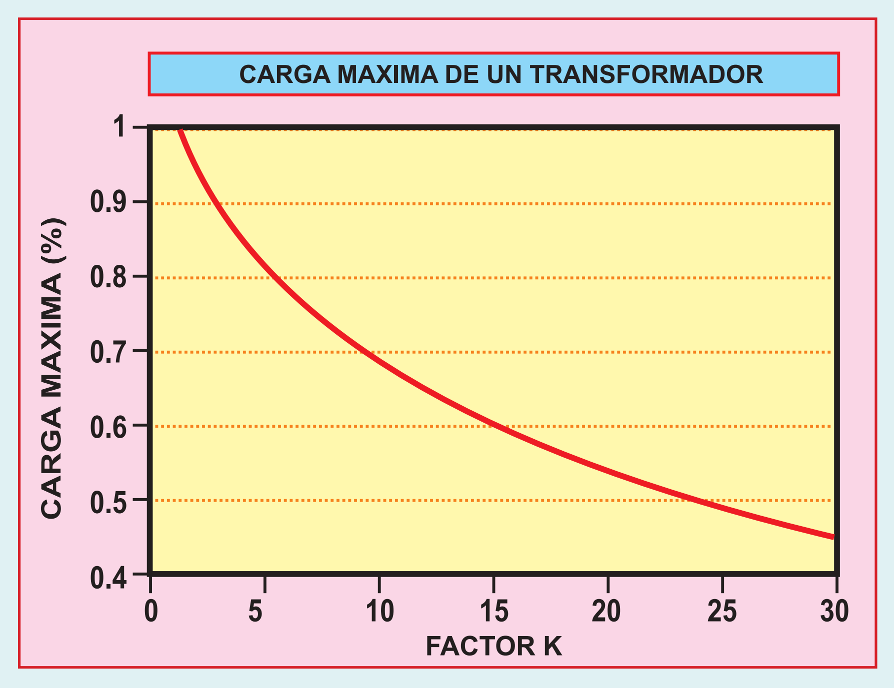


Figura 13

Carga máxima en un transformador en función del factor K.

TABLA 9

Factor K de un rectificador trifásico

h	I_h %	$I_h^{\ 2}$	$h^2\ I_h^{\ 2}$
1	100	10000	10000
5	17,5	306,25	7656,25
7	11,0	121,00	5929,00
11	4,5	20,26	2450,25
14	2,9	8,41	1421,29
17	1,5	2,25	150,25
19	1,0	1,00	361,00
SUMA		10459.16	28468.04

FACTOR K = 28468 /10459 = 2.72

De la Tabla 9 se deduce que el factor K de un puente rectificador trifásico convencional es 2,72, de modo que, observando el gráfico 1, la carga máxima que soporta un transformador es 90,4 % de la nominal, si la única carga que existe es el rectificador citado.

En la actualidad existen transformadores diseñados para trabajar en sistemas con armónicas, con valores de K especificados en su placa.

7. ERRORES DE INSTRUMENTOS CONVENCIONALES POR EFECTO DE LAS ARMÓNICAS

La presencia de armónicas afecta severamente la lectura de los instrumentos, lo que implica tomar en cuenta diversas precauciones al realizar una lectura. El análisis que se realiza a continuación se *refiere* a los instrumentos de uso frecuente.

7.1. Instrumentos de aguja de tipo electrodinamométrico

Estos instrumentos son los de uso más común en tableros industriales. Su principio de funcionamiento es tal que indican el verdadero valor efectivo (true rms) de la onda. Dado que emplean inductancias y sólo consideran usualmente hasta la armónica 5 en forma fidedigna. Su mayor problema se relaciona con la calibración ya que, al existir piezas mecánicas giratorias, el roce provoca un error (leen menos) de lectura.

7.2. Instrumentos digitales con rectificador a la entrada

La gran mayoría de los instrumentos digitales a la entrada disponen de un rectificador de modo tal que lo que realmente miden es el valor medio de la onda rectificada. Por cierto, si la onda es sinusoidal el instrumento es de buena precisión. Si la onda tiene armónicas, el instrumento mide un valor inferior al valor eficaz. En la medición de corrientes como las registradas en computadores, el instrumento mide un 30% menos que el valor efectivo (rms) de la corriente. La Tabla 10 muestra valores reales medidos en un edificio de oficinas.

TABLA 10

Mediciones en un edificio de oficinas con dos tipos de instrumentos

	Valor efectivo [A rms]	Valor medido* [A]	Error [%]
FASE A	410	328	- 20,0
FASE B	445	346	- 22,2
FASE C	435	355	- 18,4
NEUTRO	548	537	- 2,0

* Instrumento digital con rectificador a la entrada.

En el caso de la medición de corrientes de neutro, no es generalizable que un instrumento digital con rectificador mida con poco error. En efecto, si la corriente de neutro tiene la forma señalada en la Figura 7, entonces la medición es precisa, ya que la onda si bien es de 150 Hz es aproximadamente sinusoidal. Pero, si el consumo es desequilibrado (situación que no se observa en la Tabla 10 ni en la Figura 7), entonces el error en la medición de corriente por el neutro será también elevado, debido a que se tendrá una componente de 50 Hz sumada con otra de 150 Hz.

7.3. Instrumentos de verdadero valor efectivo (true rms)

En general, en estos instrumentos, de tipo digital, se emplea un sensor que registra la elevación de temperatura por una resistencia por la cual circula la corriente a medir. Por tanto, el instrumento mide el verdadero valor efectivo de la corriente (o el voltaje) incluyendo todas las armónicas. Debido a que se mide un fenómeno térmico el instrumento no es apto para medir consumos de rápida variación; es usual que registre una medición cada 1 ó 2 segundos.

Otros equipos, de mayor calidad, miden empleando un conversor análogo-digital (llamado de doble rampa); el proceso de lectura en estos casos toma 400 milisegundos.

7.4. Instrumento para medir armónicas

Para determinar el contenido armónico de la corriente o el voltaje, no existe otro procedimiento que emplear un medidor de armónicas, las que en general despliegan en pantalla las formas de onda, el valor de la fundamental, de cada armónica, el valor efectivo, el valor máximo y la distorsión total.

8. REFERENTES A DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE ELECTRICIDAD

Se ha entregado abundantes antecedentes referentes a distorsión armónica. La Tabla 11 resume las características técnicas que precisan mediante cifras numéricas la presencia anormal del fenómeno. Los efectos de la distorsión armónica se resumen en la Tabla 12.

Para aminorar los problemas de distorsión armónica a niveles permitidos por norma, se deben llevar a cabo algunas de las acciones señaladas en la Tabla 13.

TABLA 11

Características límites de las perturbaciones

Término empleado	Descripción
Distorsión armónica	El voltaje deja de ser sinusoidal: la distorsión de voltaje total es mayor que un 5%. La corriente consumida por el usuario es fuertemente no sinusoidal: la distorsión total de corriente es superior al 20%.
Diferencial de voltaje entre	Por el conductor de neutro circula la corriente debida a los desequilibrios entre cada fase y a componentes armónicas principalmente de orden 3. El voltaje en el conductor de neutro no no debe ser superior a 0,6 V. Puede medirse como voltaje entre neutro y tierra.

TABLA 12

Efectos de la distorsión armónica

Equipo	Efectos observados
Transformador	Sobrecalentamiento si el factor K es elevado (superior a 2,7) y la carga es superior al 90% de la nominal.
Condensadores	Los condensadores (de compensación de factor de potencia, de iluminación, por ejemplo) se queman si la corriente por ellos es más que 1,3 veces su corriente nominal.
Motores de inducción	Sobrecalentamiento y vibraciones excesivas si la distorsión de tensión es superior al 5%.
Cables de conexión	Sobrecalentamiento si el valor efectivo de la corriente (medido con un instrumento true rms) es superior al que soporta el cable.
Equipos de computación	Pérdidas de algunos datos y daños en algunas componentes electrónicas debido a que el voltaje máximo es superior al nominal o a que existe un diferencial de voltaje entre neutro y tierra.

TABLA 13

Medidas de Mejoramiento de instalaciones eléctricas contaminadas por armónicas

Equipo o instalación	Proyecto o mejoramiento
Distribución de electricidad	• Dimensionamiento de conductores considerando armónicas. • Disminución de las corrientes por el neutro mediante balance de cargas. • Disminución de las corrientes armónicas mediante filtros y transformadores de aislación. Tableros separados para equipos sensibles.
Condensadores	• Sustitución por condensadores antiresonantes.
Equipos contaminantes	• Mejoramiento de los equipos (exigencia a los fabricantes de de ubicar filtros de línea o reactancias serie). • Ejemplo de transformadores de aislación

CALIDAD DE LA RED ELÉCTRICA

PARTE 2. REGULACIÓN DE VOLTAJE

1. INTRODUCCIÓN

La causa principal para definir las holguras de voltaje, con respecto al valor nominal, se relaciona con garantizar el funcionamiento de equipos en rangos específicamente determinados. Los equipos que son más afectados por una mala regulación de voltaje son las luminarias (que disminuyen fuertemente su vida útil cuando el voltaje crece) y los motores (que aumentan sus pérdidas y a veces no parten cuando el voltaje es muy bajo).

Una caída de voltaje elevada en el sistema de transmisión se puede deber a:

a) Transformadores subdimensionados, y
b) Cables subdimensionados.

Z

2. NORMAS

Las Normas Internacionales y en particular el Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos, plantean las siguientes holguras con respecto al voltaje nominal en cualquier punto de conexión entre una empresa eléctrica y cada cliente:

a) En Baja Tensión (BT). Excluyendo períodos con interrupciones de suministro, el voltaje deberá estar dentro de rango de -7,5% a +7,5% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro. Se entiende por BT los voltajes nominales menores o iguales a 660 V entrefases.

b) En Media Tensión (MT). El rango de voltaje deberá estar entre -6,0% y +6,0% en las mismas condiciones descritas en el párrafo a. Se define como MT a los voltajes mayores que 660 V y menores o iguales a 44 kV entrefases.

c) En Alta Tensión (AT). Se distinguen dos casos:

cl) Tensión Nominal menor o igual a 154 kV. El rango de voltaje deberá estar entre -6,0% y +6,0%.

c2) Tensión Nominal Superior a 154 kV. El rango de voltaje deberá estar entre -5,0% y +5,0%-

Se entiende por AT los voltajes superiores a 44 kV entrefases y menores o iguales a 220 kV entrefases. Los voltaje superiores se denominan EAT, es decir, extra alta tensión.

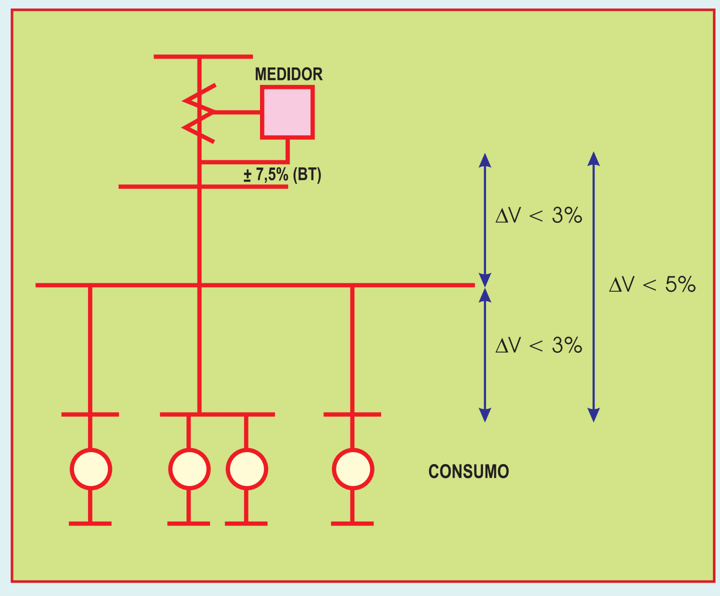


Figura 1
Caídas de voltaje máximas permitidas.

Además de lo anterior, el Reglamento de Instalaciones Eléctricas en Chile establece que la caída de tensión provocada por la corriente máxima que circula por un conductor no debe exceder de un 3% de la tensión nominal de alimentación. Junto a lo anterior, establece que la caída de tensión en el punto más desfavorable de la instalación no debe exceder de un 5% de dicha tensión. La Figura 1 gráfica esta disposición.

3. REGULACIÓN DE VOLTAJE DE TRANSFORMADORES: TRANSFORMADORES SUBDIMENSIONADOS

3.1. Transformadores monofásicos

Las principales características de un transformador, desde el punto de vista de la regulación de voltaje son:

a) Reactancia REACT o también llamada tensión de cortocircuito. Es el porcentaje del voltaje nominal que hace circular corriente nominal por el transformador cuando se cortocircuita uno de sus terminales.

b) Corriente de vacío IVAC es la corriente que consume el transformador sin carga.

c) Pérdidas en carga PERCAR, representa las pérdidas en los enrollados (de cobre usualmente), con el transformador con carga nominal.

d) Pérdidas en vacío PERVAC, son las pérdidas del transformador cuando éste se encuentra sin carga.

La Tabla 1 muestra los valores típicos de estos parámetros de transformadores de diferentes potencias. Los valores se expresan en porcentaje de los valores nominales de cada transformador.

En forma aproximada, la caída de tensión en un transformador, se puede calcular mediante:

$$\Delta V\% = PERCAR\% \; \frac{POUT/PNOM}{VOUT/VNOM} + REACT\% + \frac{QOUT/PNOM}{VOUT/VNOM}$$

$\Delta V\%$: caída de tensión en porcentaje del voltaje
VOUT : nominal voltaje a la salida del transformador
POUT : potencia activa (carga) a la salida del transformador
QOUT : potencia reactiva (carga) a la salida del transformador
VNOM : voltaje nominal a la salida del transformador

TABLA 1

Parámetros característicos de transformadores monofásicos

PNOM [KVA]	REACT [%]	IVAC [%]	PERCAR [%]	PERCAR [%]
8	5,0	6,56	5,000	1,313
10	5,0	5,75	5,300	1,150
12,5	5,0	4,80	5,080	0,960
16	4,5	4,38	4,563	0,875
20	4,5	3,75	4,325	0,750
25	4,5	3,50	4,260	0,700
31,5	4,0	3,17	3,810	0,635
40	4,0	3,69	3,500	0,538
50	5,0	2,65	3,800	0,530
63	5,0	2,42	3,175	0,484
80	4,5	2,81	3,063	0,563
100	5,5	2,25	3,950	0,450
125	5,0	2,10	3,160	0,420
160	5,0	1,98	2,709	0,397

El tamaño de un transformador (PNOM) es, por tanto, uno de los factores más relevantes en la caída de tensión de un transformador. Esto también se refleja en las pérdidas; por ello, es útil calcular las potencias a la entrada del transformador, lo que es:

$$PIN = POUT + \frac{PERCAR}{100}\ \frac{POUT^2 + QOUT^2}{PNOM} + \frac{PERVAC}{100}\left(\frac{VOUT}{VNOM} + \frac{\Delta V\%}{100}\right)^2 PNOM$$

$$QIN = QOUT + \left(\frac{VOUT}{VNOM} + \frac{\Delta V\%}{100}\right)^2 \frac{IVAC}{100}\ PNOM + \frac{REACT}{100} \cdot \frac{POUT^2 + QOUT^2}{PNOM}$$

La Figura 2 muestra los resultados numéricos obtenidos al aplicar los conceptos y cálculos a dos sistemas alimentados con transformadores de distinto tamaño.

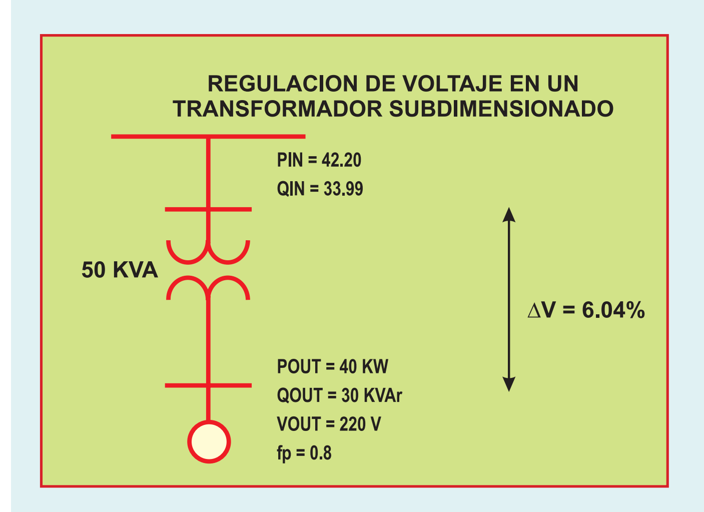


Figura 2a

Regulación de voltaje en un transformador subdimensionado

REGULACION DE VOLTAJE EN UN
TRANSFORMADOR BIEN DIMENSIONADO
PIN = 41.59
QIN = 33.65
63 KVA
ΔV = 4.4%
POUT = 40 KW
QOUT = 30 KVAr
VOUT = 220 V
fp = 0.8

Figura 2b

Regulación de voltaje en un transformador dimensionado correctamente.

3.2. Transformadores Trifásicos

Los transformadores trifásicos se rigen por parámetros idénticos a los transformadores monofásicos. La Tabla 2 resume los valores de algunos de ellos.

Los resultados y ecuaciones mostradas para transformadores monofásicos se aplican en forma idéntica a transformadores trifásicos.

Los parámetros mostrados en las Tablas 1 y 2 corresponden a transformadores cuyos voltajes primarios y secundarios están en el rango de baja tensión. Cuando se trabaja con transformadores AT/BT, es decir, cuyo primario se conecta a alta tensión, las pérdidas en carga disminuyen levemente (Tabla 3).

TABLA 2				
Parámetros característicos de transformadores trifásicos (BT/BT)				
PNOM [KVA]	REACT [%]	IVAC [%]	PERCAR [%]	PERVAC [%]
10	5,5	7,50	5,000	1,500
12,5	5,5	6,40	4,800	1,280
16	5,5	5,31	5,250	1,063
20	5,5	6,75	4,000	1,350
25	5,5	6,20	4,720	1,240
31,5	5,0	5,56	3,937	1,111
40	5,0	4,38	3,825	0,875
50	4,5	4,10	3,300	0,820
63	5,0	3,65	3,413	0,730
80	5,0	3,25	3,175	0,650
100	5,5	2,85	3,700	0,570
200	5,0	1,98	2,950	0,395
400	6,0	1,55	2,325	0,310
500	6,0	1,49	1,880	0,297
800	5,5	1,35	1,425	0,270

TABLA 3				
Parámetros característicos de transformadores trifásicos (AT/BT)				
PNOM [KVA]	REACT [%]	VAC [%]	PERCAR [%]	PERVAC [%]
100	6,0	2,5	1,830	0,550
160	6,0	2,3	1,525	0,406
250	6,0	2,0	1,328	0,348
315	6,0	1,8	1,302	0,327
400	6,0	1,5	1,178	0,300
500	6,0	1,5	1,134	0,280
630	6,0	1,3	1,081	0,254
800	6,0	1,3	0,984	0,250

4. MEJORAMIENTO DE LA REGULACIÓN CON CONDENSADORES DE COMPENSACIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

En un sistema que se caracteriza por un consumo de potencia activa y reactiva, es decir, en el que existen motores de inducción u otras cargas similares, se debe usar condensadores de compensación de factor de potencia. Ello permite mejorar la regulación de voltaje, disminuyendo la caída de tensión en el transformador; además, disminuyen las pérdidas en el transformador.

Las ecuaciones descritas se mantienen, con la salvedad de que la potencia reactiva de la carga se debe disminuir según la cantidad de reactivos capacitivos compensados. La Figura 3 muestra claramente el efecto logrado al conectar condensadores. Se la compara con un sistema en que no se emplean condensadores.

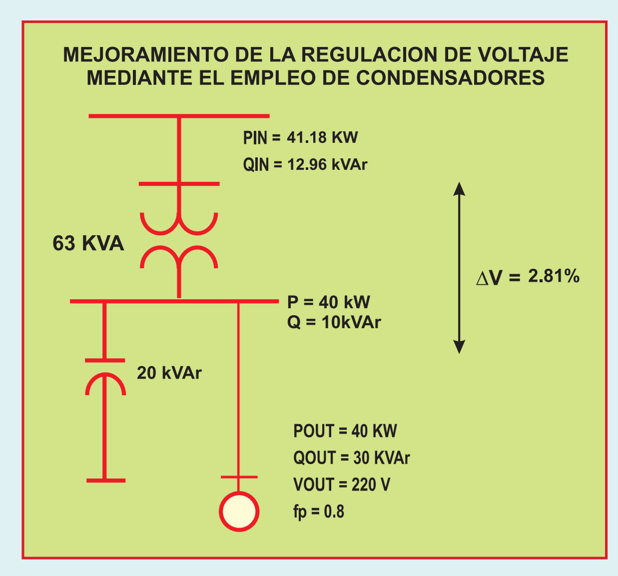


Figura 3

Mejoramiento de la regulación de voltaje mediante el empleo de condensadores.

5. CAÍDAS DE TENSIÓN EN CONDUCTORES Y CABLES DE CONEXIÓN

5.1. Características de conductores relacionadas con la regulación de voltaje

Para calcular la caída de tensión en cables y conductores, es necesario conocer su resistencia y reactancia. A falta de mejores antecedentes se puede emplear:

$$R\ COND = 22,5\ \Omega\ mm^2/km$$

$$X\ COND = 0,08\ \Omega/km$$

La Tabla 4 muestra las características de cables de más de 50 mm2 en los cuales la aproximación señalada no es tan adecuada.

TABLA 4
Características de monoconductores tipo XAT 5kV

SECCION		RESISTENCIA	REACTANCIA	
AWG	mm^2	Ω/km	DUCTO [1] Ω/km	BANDEJA [2] Ω/km
1/0	53,49	0,421	0,136	0,257
2/0	67,43	0,334	0,131	0,251
3/0	85,01	0,265	0,130	0,249
4/0	107,20	0,210	0,125	0,244
250	127,00	0,177	0,122	0,239
300	152,00	0,148	0,120	0,237
350	177,30	0,127	0,117	0,233
400	202,70	0,111	0,115	0,230
500	253,40	0,089	0,112	0,228
600	304,00	0,074	0,108	0,222
650	328,90	0,068	0,107	0,220
700	354,70	0,063	0,106	0,219
750	380,00	0,059	0,105	0,218
800	405,40	0,056	0,104	0,217
900	456,00	0,049	0,102	0,215

[1] Los valores de reactancia están calculados para ducto no magnético con 3 conductores en formación triangular.
[2] Los valores de reactancia están calculados en bandeja con 3 conductores en paralelo con una separación de un diámetro entre cables.

La caída de tensión en un cable se puede calcular aproximadamente mediante:

$$\Delta V\% = RL \frac{POUT}{VNOM\ VOUT} 100 + XL \frac{QOUT}{VNOM\ VOUT} 100$$

X	Reactancia del cable en Ω/km
R	Resistencia del cable en Ω/km
L	Largo del cable en km
POUT	Potencia activa en el extremo del cable, monofásica, W.
QOUT	Potencia reactiva en el extremo del cable, monofásica, VAR.
VNOM	Voltaje Nominal, fase neutro, V.
VOUT	Voltaje en el extremo del cable, fase neutro, V.
ΔV%	Caída de voltaje en el cable, en % de VNOM.

En el caso de sistemas monofásicos debe considerarse la caída AV% en el cable de fase y en el de neutro considerando sus respectivas secciones.

5.2. Cálculo de pérdidas en cables

La caída de tensión en cables está normalmente asociada a pérdidas en el cable. Por tal razón, es útil disponer de ecuaciones que permitan calcular las potencias a la entrada de un cable:

$$PCAB\ [kW] = POUT\ [kW] + RL\ I^2[A^2]\ 10^{-3}$$

$$QCAB\ [kVAr] = QOUT\ [kVAr] + XL\ I^2[A^2]\ 10^{-3}$$

PCAB	: potencia activa a la entrada del cable [kW]
POUT	: potencia activa a la salida del cable [kW]
QCAB	: potencia reactiva a la entrada del cable [kVAr]
QOUT	: potencia reactiva a la salida del cable [kVAr]
I	: corriente por el cable [A]

La corriente por el cable se puede expresar mediante:

$$I\ [A] = \frac{1000}{VOUT} \sqrt{POUT^2 + QOUT^2}$$

5.3. Efecto de la sección de un conductor en la regulación de voltaje

Con las ecuaciones anteriores es posible calcular las caídas de tensión en cables, verificar el cumplimiento de los reglamentos y normas. La Figura 4 muestra un ejemplo en el que, si bien se emplean conductores que soportan la corriente demandada por el sistema, la regulación de voltaje no resulta ajustada a normas. Por el contrario, en la Figura 5 en el mismo sistema se han empleado conductores de una sección levemente mayor, que garantizan el funcionamiento de los equipos desde el punto de vista de la regulación de voltaje. Se adjunta una memoria de cálculo del caso de la Figura 4.

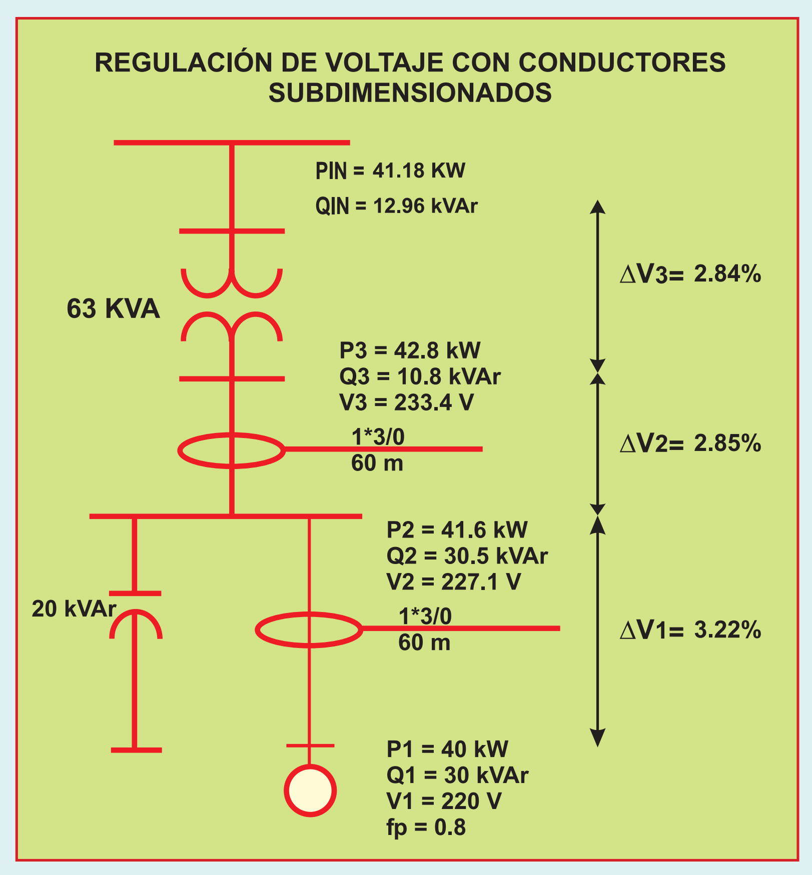


Figura 4
Regulación de voltaje con conductores subdimensionados

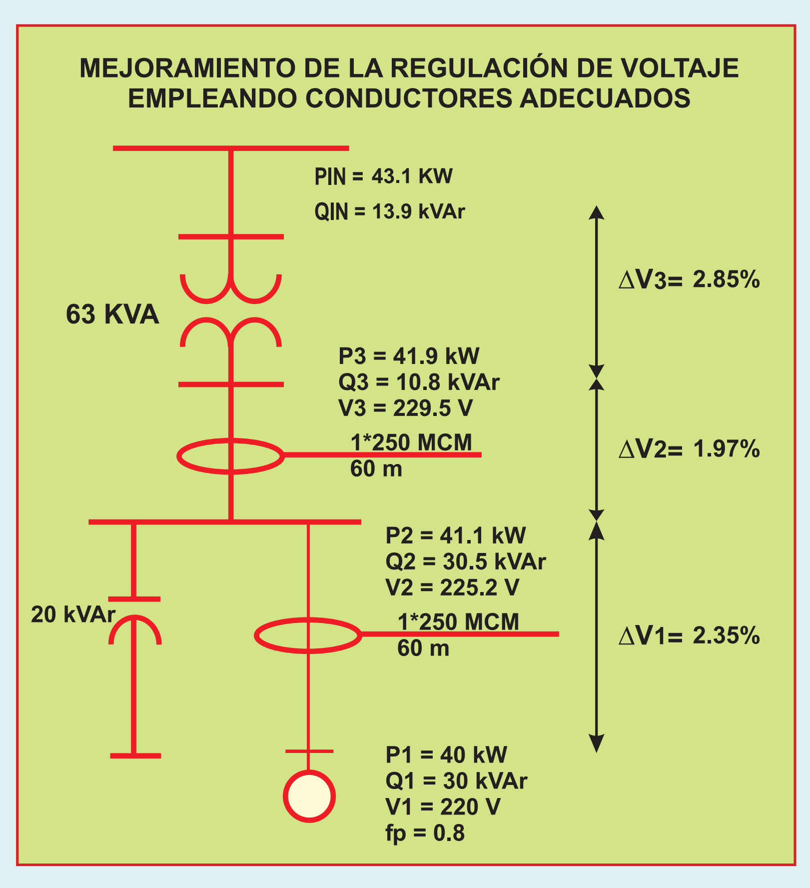


Figura 5
Mejoramiento de la regulación de voltaje empleando conductores adecuados

Memoria de Cálculo (Figura 4).

$$P2= P1 + 2 \bullet RL \frac{(P1^2 + Q1^2)1000}{V1^2} = 40+2 \bullet 0.2647 \bullet 60 \bullet 10^{-3} \frac{(40^2+30^2)1000}{220^2} = 41.6Kw$$

$$Q2 = Q1 + 2 \bullet XL \frac{(P1^2 + Q1^2)1000}{V1^2} = 30+2 \bullet 0.08 \bullet 60 \bullet 10^{-3} \frac{(40^2+30^2)1000}{220^2} = 30.5KwAr$$

$$\Delta V1= 2 RL \frac{P1 \bullet 1000}{V1 \bullet 1000} \bullet 100 + 2XL \frac{Q1 \bullet 1000}{V1 \bullet VNOM} \bullet 100 = 3.22\%$$

$$V2= V1 + \Delta V1 \bullet VNOM / 100 = 227,1 V$$

$$Q2C = Q2 \bullet QCAP = 30.5 \bullet 20 = 10.5 kVAr$$

$$P3= P2 + 2RL \frac{(P2^2 + Q2C^2) 1000}{V2^2} = 42,8 Kw$$

$$Q3= Q2C + 2XL \frac{(P2^2 + Q2C^2) 1000}{V2^2} = 10,8 KVAr$$

$$\Delta V2= 2RL \frac{P2 \bullet 1000}{V2 \bullet 1000} \bullet 100 + 2XL \frac{Q2C \bullet 1000}{V2 \bullet VNOM} \bullet 100 = 2.85$$

$$V3= V2 + \Delta V2 \ VNOM / 100 = 233,4 V$$

$$\Delta V3= \frac{PERCAR}{PNOM} \quad \frac{P3}{V3/VNOM} + \frac{REACT}{PNOM} + \frac{Q3}{V3/VNOM}$$

$$\Delta V3= \frac{3.175}{63} \quad \frac{42.0}{233.4/220} + \frac{5}{63} \quad \frac{10.8}{233.4/220} = 2.84\%$$

$$P4 = P3 + \frac{PERCAR}{100} \quad \frac{P3^2 + Q3^2}{PNOM} \quad \frac{VNOM^2}{V3^2} + \frac{PERVAC}{100} \left(\frac{V3}{VNOM} + \frac{\Delta V3}{100}\right)^2 \bullet PNOM \bullet 1000 = 44,0 Kw$$

$$Q4 = Q3 + \frac{IVAC}{100} \left(\frac{V3}{NOM} + \frac{V3^2}{100}\right) PNOM \bullet 1000 + \frac{REACT}{100} \left(\frac{VNOM}{V3}\right)^2 \frac{P3^2 + Q3^2}{PNOM \bullet 1000} = 14,0 kVAr$$

5.4. Regulación de voltaje en sistemas trifásicos

Es evidente que lo explicado se aplica directamente a sistemas trifásicos. Es necesario poner atención en dos aspectos:

a) Las ecuaciones se deben aplicar considerando la potencia por fase (es decir 1/3 de la potencia total manejada por el sistema).
b) Los voltajes deben ser fase neutro (y no entrefases).
c) Se debe asumir una caída de voltaje en el neutro.

La Figura 6 muestra los resultados al alimentar el mismo esquema anterior de la Figura 4 en forma trifásica. Se ha supuesto nula la caída en el conductor de neutro. Si bien los conductores soportan la corriente, la regulación de voltaje no resulta aceptable (Figura 6) y, por tanto, se procede a incrementar la sección de los conductores (Figura 7). Se agrega una memoria de cálculo para el caso de la Figura 6.

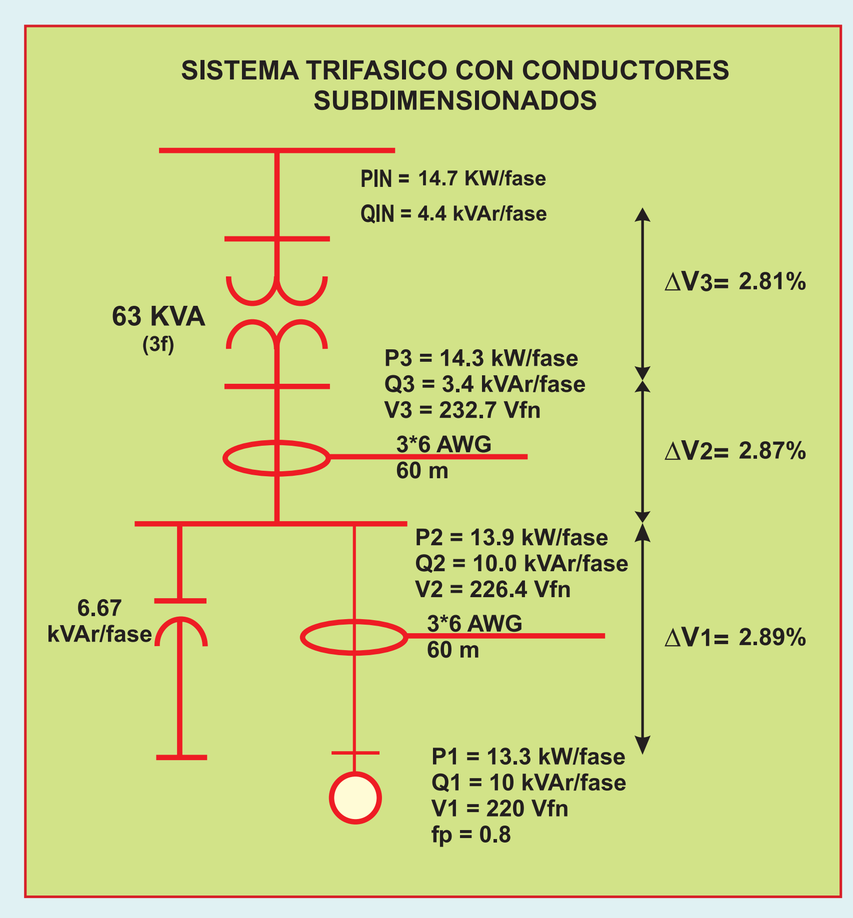


Figura 6

Sistema trifásico con conductores subdimensionados.

Memoria de Cálculo (Figura 6).

$$P2 = P1 + RL\frac{(P1^2 + Q1^2)\,1000}{V1^2} = 13.3 + 1.692 \bullet 60 \bullet 10^{-3}\,\frac{(3.3^2+10^2)1000}{220^2} = 13.9 \text{ kW/ Fase}$$

$$Q2 = Q1 + XL\frac{(P1^2 + Q1^2)\,1000}{V1^2} = 10 + 0.08 \bullet 60 \bullet 10^{-3}\,\frac{(13.3^2+10^2)\,1000}{220^2} = 10.0 \text{ kVAr/ Fase}$$

$$\Delta V1 = RL\,\frac{P1 \bullet 1000}{V1\ VNOM}\,100 + XL\,\frac{Q1\ 1000}{V1\ \ VNOM} \bullet 100 = 2.89\%$$

$$V2 = V1 + \Delta V1 \bullet VNOM / 100 = 226{,}4 \text{ V fn}$$

$$Q2C = Q2 \quad QCAP = 10{,}0 \quad 6.67 = 3.33 \text{ kVAr/ Fase}$$

$$P3 = P2 + RL\,(P2^2 + Q2C^2) \bullet 1000 / V2^2 = 14{,}3 \text{ kW/ Fase}$$

$$Q3 = Q2C + XL\,(P2^2 + Q2C^2) \bullet 1000 / V2^2 = 10{,}8 \text{ kVAr/ Fase}$$

$$\Delta V2 = RL\,\frac{P2 \bullet 1000}{V2 \bullet 1000} \bullet 100 + XL\,\frac{Q2C \bullet 1000}{V2 \bullet VNOM} \bullet 100 = 2.87\%$$

$$V3 = V2 + \Delta V2 \bullet VNOM / 100 = 232{,}7 \text{ V Fn}$$

$$\Delta V3 = \frac{PERCAR}{PNOM}\ \frac{P3}{V3/VNOM} + \frac{REACT}{PNOM}\ \frac{Q3}{V3/VNOM}$$

$$\Delta V3 = \frac{3.175}{63}\ \frac{14{,}3}{232.7/220} + \frac{5}{63}\ \frac{10.8}{232.7/220} = 2.81\%$$

$$P4 = P3 + \frac{PERCAR}{100}\ \frac{P3^2 + Q3^2}{PNOM}\ \frac{VNOM^2}{V3^2} + \frac{PERVAC}{100}\left[\frac{V3}{VNOM} + \frac{\Delta V3}{100}\right]^2 PNOM\ \ 1000 = 14{,}7 \text{ kW/ Fase}$$

$$Q4 = Q3 + \frac{IVAC}{100}\left[\frac{V3}{VNOM} + \frac{\Delta V3}{100}\right]^2 PNOM \bullet 1000 + \frac{REACT}{100}\left[\frac{VNOM}{V3}\right]^2 \frac{P3^2 + Q3^2}{PNOM \bullet 1000} = 4{,}4 \text{ kVAr/ Fase}$$

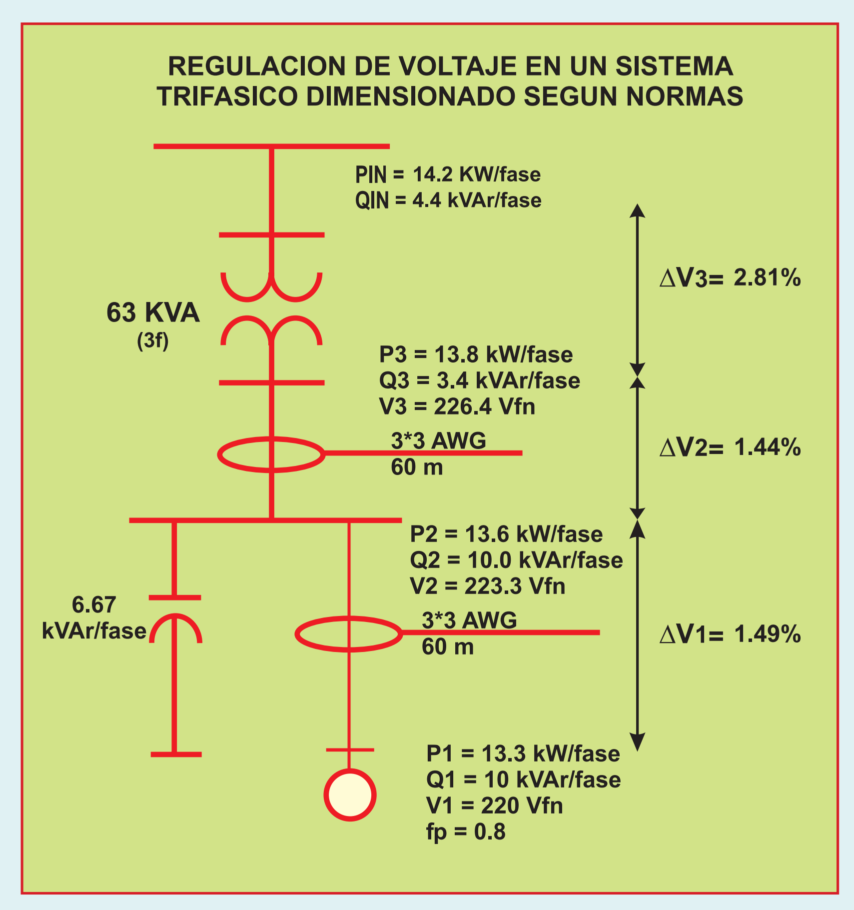


Figura 7

Regulación de voltaje en un sistema trifásico dimensionado según normas.

6. RESUMEN DE RECOMENDACIONES RELACIONADAS CON REGULACIÓN DE VOLTAJE

La regulación de voltaje es una de las características relevantes de la calidad de la red eléctrica. Ello se debe a que ella es causa del rápido envejecimiento de diferentes equipos eléctricos: luminarias, equipos electrónicos y motores, son los equipos más dañados.

La Tabla 5 resume los efectos estudiados que inciden en una regulación de voltaje.

TABLA 5

Problemas que afectan una mala regulación de voltaje.

PROBLEMA	MALO	ADECUADO
Transformador subdimensionado	ΔV = 6,0%	ΔV = 4,4%
Factor de potencia	ΔV = 4,4%	ΔV = 2,8%
Conductor subdimensionado (monofásico)	ΔV = 3,2%	ΔV = 2,3%
Conductor subdimensionado (trifásico)	ΔV = 2,9%	ΔV = 1,5%

* *Los valores citados corresponden a los ejemplos analizados.*

PARTE 3. FLUCTUACIONES DE VOLTAJE DE BAJA FRECUENCIA

Límites de Centelleo (Flicker)

1. INTRODUCCIÓN

La combinación de variaciones elevadas de la corriente y una impedancia de red también elevada, puede causar variaciones excesivas de la tensión de alimentación. Si las variaciones de tensión se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones de la iluminación, principalmente de aquella emitida por ampolletas incandescentes. Normas recientes (IEC 868-0 de 1991), han establecido los límites adecuados y la forma de medir las fluctuaciones de tensión aludidas.

2. FLUCTUACIONES DE LA CORRIENTE: APLICACIÓN EN HORNOS Y SOLDADORAS DE ARCO

La Figura 1 muestra la fluctuación de la corriente medida en barras de 12 kV, de un horno de arco. La corriente fluctúa entre 300 A mx y 500 A mx:

Imin = 212 A rms

Imx = 354 A rms

Esto significa que la fluctuación de potencia trifásica aparente es:

$$Smin = \sqrt{3} \bullet 12000 \bullet 212 = 4406 \text{ KVA}$$

$$Smax = \sqrt{3} \bullet 12000 \bullet 354 = 7358 \text{ KVA}$$

La alimentación de este horno se realiza a través de un transformador de 3 MVA, de tal modo que el gráfico mostrado puede ser considerado como el peor caso registrado.

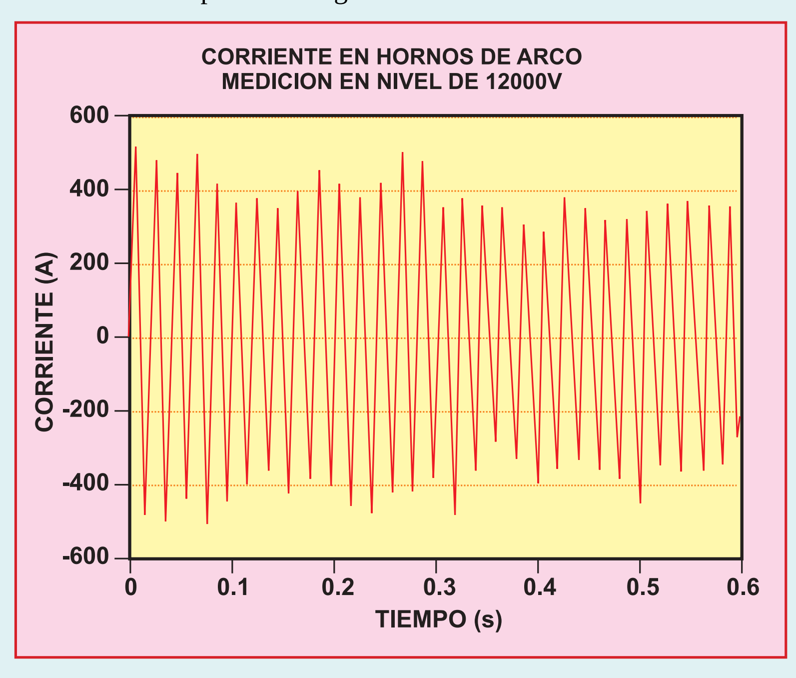


Figura 1

Corriente en un horno de arco.

La caída de tensión que produce esta corriente depende de la impedancia de la red. Si se supone una corriente de cortocircuito de 4877 A en 12 kV, se tiene que la impedancia de la red de alimentación es:

$$X = 1.42\ \Omega$$

Esto significa caídas de tensión de:

ΔVmin = 1.42 • 212 V rms fase neutro

ΔVmax = 1.42 • 354 V rms fase neutro

ΔVmax - ΔVmin = 201.64 V rms fase neutro = 2.9 %.

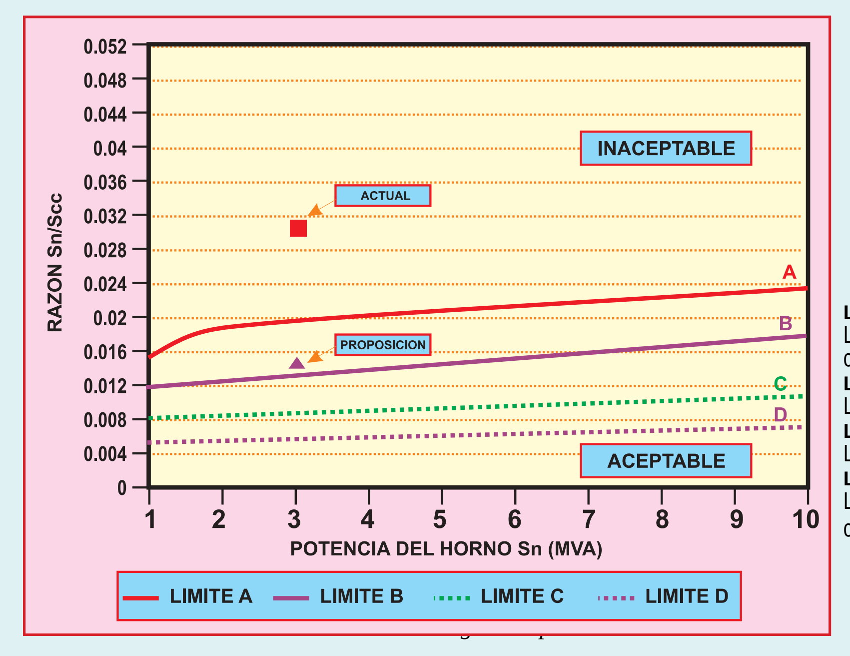
Una fluctuación de tensión de esta magnitud afecta el funcionamiento de muy pocos equipos. Sin embargo, es seguramente perceptible una variación de la luminosidad de las ampolletas incandescentes. En efecto, las Normas establecen variaciones permisibles bastante inferiores al 2.9% calculado, si esta variación ocurre a una frecuencia cercana a los 10 Hz.

La Tabla 1 muestra los límites permitidos de variación de voltaje, dependiendo de la frecuencia a la que esta variación ocurre.

TABLA 1

Variaciones permitidas de tensión en función de la frecuencia

FRECUENCIA DE LA FLUCTUACIÓN [Hz]	FLUCTUACION PERMITIDA DEL VOLTAJE [%]
0.5	2.340
2.0	0.882
4.0	0.500
6.0	0.328
8.0	0.256
10.0	0.260
12.0	0.312
14.0	0.388
16.0	0.480
18.0	0.584
20.0	0.700
22.0	0.824



Límite A:
Límite umversalmente definido como inaceptable.
Límite B:
Límite superior aceptado por IEEI
Límite C:
Límite sugerido por IEEE.
Límite D:
Límite universalmente aceptado como seguro.

Como esta fluctuación del voltaje es difícil de medir[1] (Norma IEC 868: Flickermeter: Functional and design specifications, 1990), es posible emplear recomendaciones internacionales de un tipo más general. Así, la Figura 2 muestra los niveles aceptables de corriente de cortocircuito en función de la potencia del horno.

En el ejemplo en estudio se tiene:

$$\frac{S_N}{S_{cc}} = \frac{3 \bullet 10^6}{\sqrt{3 \bullet 12000 \bullet 4877}} = 0.0296$$

$$S_N = 3 \bullet 10^6 [VA]$$

Se observa que la situación descrita es inaceptable. Se sugiere un valor:

$$\frac{S_N}{S_{cc}} = \frac{3 \bullet 10^6}{\sqrt{3 \bullet 12000 \bullet 10300}} = 0.014$$

Esto implica que la impedancia de la red es:

$$X = \frac{12000}{\sqrt{3 \bullet 10300}} = 0{,}673\Omega$$

De este modo:

AVmax - AVmin = 95.5 V rms fase neutro = 1.38 %.

Así, al disminuir la reactancia de la red de 1.42 *Q*. a 0.673 *Q*, (factor 0.474), el flicker disminuye en la misma proporción. En el caso estudiado el flicker medido[2]] fue de:

AV = 0.596 % (con X = 1.420),

entonces, en el nuevo caso:

AV = 0.282 % (con X = 0.673 Q).

El valor máximo permitido es 0.25% (lo que equivale a una unidad de flicker). Esto corrobora que, en este caso, la recomendación mostrada en la Figura 2 es aplicable, ya que sobrepasar el flicker en un 13% en el peor caso, que ocurre con poca frecuencia, es adecuado, ya que, como se sabe, es necesario realizar un promedio estadístico de mediciones. En alguna medida poco importante, es posible reducir las variaciones de corriente con un control adecua-do del acercamiento de los electrodos al punto donde se realiza la fusión.

3. FLICKER INTRADOMICILIARIO: EFECTO DE LOS CONDUCTORES

Es común, en instalaciones domiciliarias, observar un centelleo de la iluminación incandescente cuando parte, en forma automática, el refrigerador de uso común. También se observa un efecto similar al energizarse un calefactor o estufa eléctrica de 1000 a 2000 W, que también, en muchos casos, tiene un mecanismo automático de conexión cuando la temperatura de la habitación baja.

La Norma IEC 555-3 (1982) establece que una caída brusca de voltaje de un 3% es visible para el ojo humano y :ausará el centelleo de lámparas incandescentes.

[1] En este caso, la variación porcentual de voltaje ponderado de flicker medido fue 0.596%. El valor máximo permitido por Norma es 0.25%. & decir, en este caso se midió 2.39 unidades de flicker, siendo el máximo permitido 1.
[2] La medición fue realizada con un instrumento especializado

Las Figuras 3, 4, 5 y 6 ilustran en 4 condiciones diferentes, la caída de tensión que se experimentará en una instalación domiciliaria al conectarse un consumo de 1500 W. La Tabla 2 resume los casos analizados.

TABLA 2			
Flicker Intradomiciliario			
Sección de la línea de acometida	Sección de la Instalación interior	Caída de Voltaje	Flicker
6,0 mm^2	2,5 mm^2	2,41%	No Visible
6,0 mm^2	1,5 mm^2	3,17%	Visible
4,0 mm^2	2,5 mm^2	2,88%	Apenas Visible
6,0 mm^2	1,5 mm^2	3,64%	Muy Visible

** Los antecedentes de la barra de alimentación y longitudes de los conductores aparecen en la Figura 4.*

Para generalizar los valores obtenidos, se han realizado dos gráficos. En la Figura 7 se muestra la sección mínima; de conductor en una instalación que no produce flicker visible. Esta sección es función de la potencia del equipo a conectar y de la longitud de la instalación interior. La línea de acometida se ha supuesto de 50 metros y de una sección de 6 mm^2. En la Figura 8 se muestra el mismo caso, pero para el caso en que la línea de acometida es de 4 mm^2. En ambos casos el transformador de alimentación del consumo es de 15 kVA.

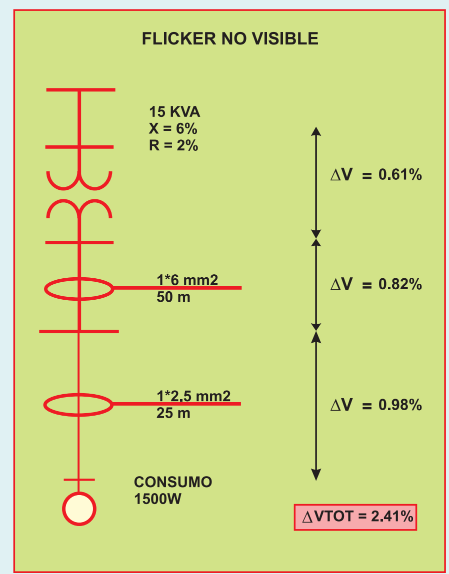


Figura 5. *Flicker no visible*

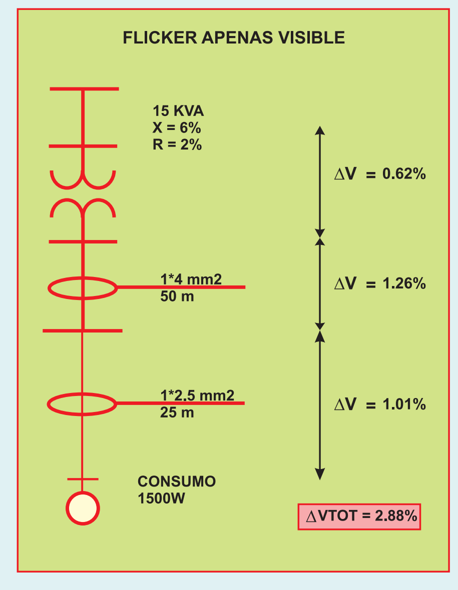


Figura 6. *Flicker apenas visible*

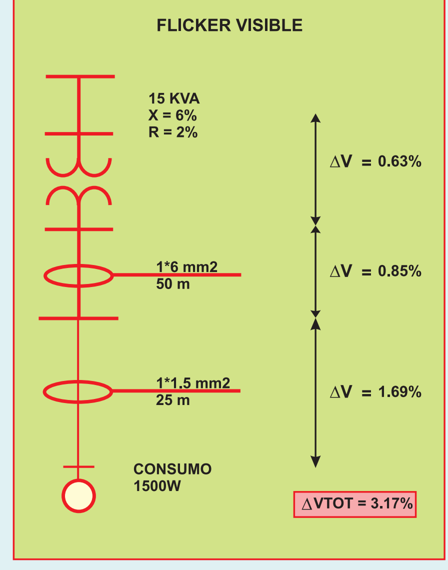


Figura 5. *Flicker visible*

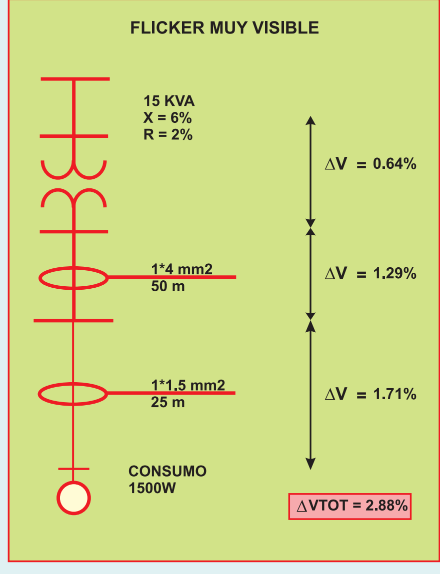


Figura 6. *Flicker muy visible*

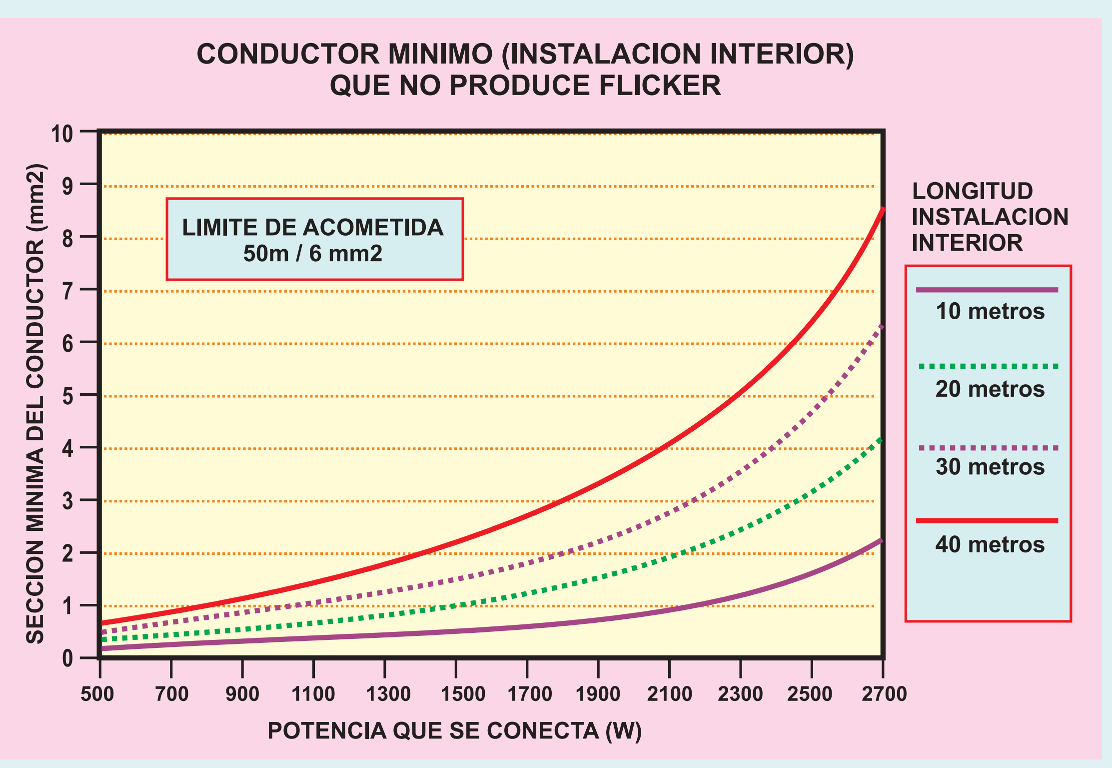


Figura 7

Sección mínima del conductor de una instalación domiciliaria sin flicker. Línea de acometida de 6 mm2.

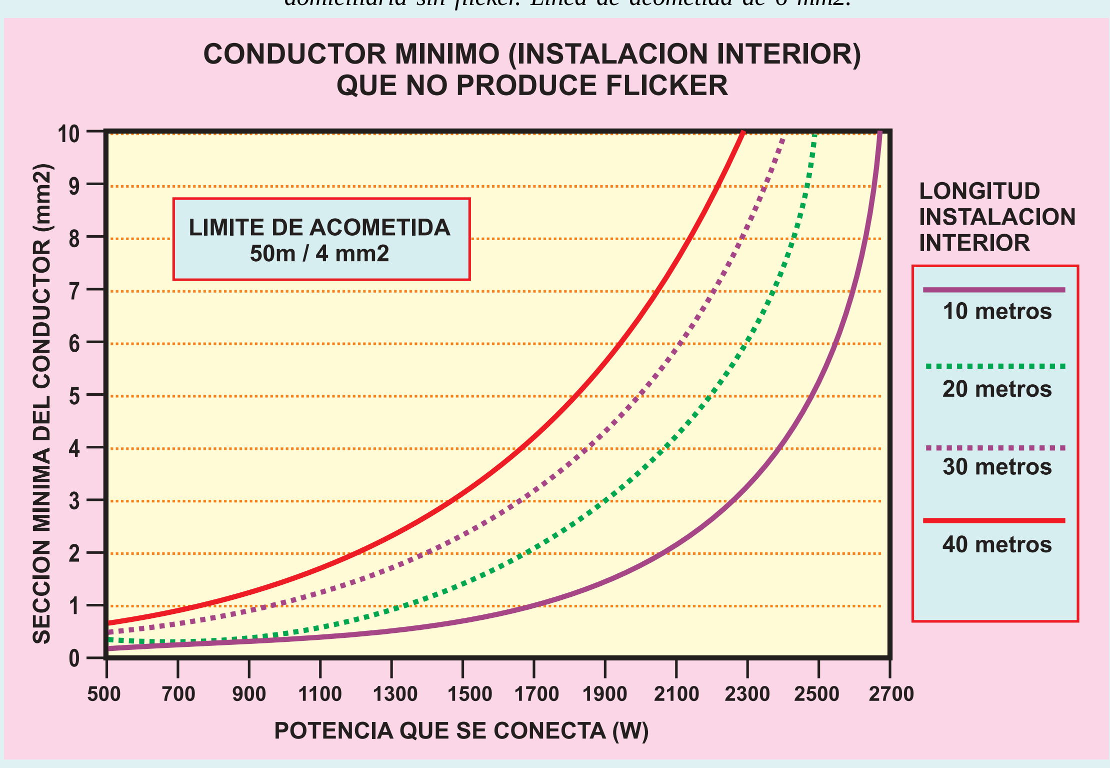


Figura 8

Sección mínima del conductor de una instalación domiciliaría sin flicker visible: línea de acometida de 4 mm^2.

4. CONCLUSIONES

El flicker o centelleo de la iluminación es una sensación visible molesta. En general, la forma de solución conduce a alimentar estas cargas, de variación rápida, mediante circuitos exclusivos o bien sobredimensionar cables y transformadores de alimentación.

El Centro de Promoción de Usos del Cobre, PROCOBRE, es una organización de derecho privado sin fines de lucro. Es patrocinado por los productores y fabricantes de cobre y su misión es promover el uso del cobre y sus aleaciones, especialmente en Chile y en Latinoamérica, fomentando una disposición favorable hacia su utilización e impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

PROCOBRE colabora y trabaja en forma coordinada con las empresas, el gobierno y los organismos relacionados con el cobre para materializar una acción convergente, con visión de largo plazo a nivel mundial.

En el cumplimiento de sus fines, PROCOBRE colabora con la edición del presente texto como un apoyo para la correcta manipulación de los productos de cobre.

EL COBRE ES ETERNO



Colombia: E-mail: colombia@copper.org http://www.procobrecolombia.org
Venezuela: E-mail: venezuela@copper.org http://www.procobrevenezuela.org
Ecuador: E-mail: ecuador@copper.org http://www.procobreecuador.org
Bolivia: E-mail: bolivia@copper.org http://www.procobrebolivia.org
Coordinación Perú: E-mail: peru@copper.org http://www.procobreperu.org
Dirección: Francisco Graña N° 671, Magdalena del Mar, Lima 17 - Perú.
Teléfonos: (51-1) 460-1600, Anexo 229. 261-4067 / 261-5931 / 461-1826
Fax: (51-1) 460-1616